



Gonçalo Jorge Marques Seleiro

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

A Contribuição Energética de Paredes de Armazenamento Térmico Simples Para Efeitos Regulamentares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques
Arguente: Prof. Doutor Albano Neves e Sousa
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2011

‘Copyright’ Gonçalo Jorge Marques Seleiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ci4ncias e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perp4tuo e sem limites geogr4ficos, de arquivar e publicar esta dissertação atrav4s de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar atrav4s de reposit4rios cient4ficos e de admitir a sua c4pia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado cr4dito ao autor e editor

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Daniel Aelenei, orientador científico deste trabalho, pelo aconselhamento do tema, orientação e ensinamentos prestados.

À minha família, pelo apoio, paciência e incentivo durante a realização deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo o estudo de um método de cálculo simplificado (em regime quase permanente) do desempenho energético de paredes de armazenamento térmico para efeitos regulamentares, inserindo-se na área dos sistemas passivos de aquecimento de ganho indirecto. Decorre da crescente importância que a adopção de energias alternativas tem vindo a assumir, considerando o panorama actual da dependência energética em combustíveis fósseis (nomeadamente petróleo), no que respeita a climatização de edifícios.

Neste trabalho são estudados diversos métodos de cálculo da contribuição energética de paredes de armazenamento térmico na redução das necessidades de aquecimento em edifícios. Os métodos simplificados são indicados pela norma ISO 13790, relativos ao desempenho energético de elementos especiais, nomeadamente os diversos tipos de sistemas de armazenamento térmico situados em fachada.

É apresentado um estudo do cálculo da contribuição energética de uma parede de armazenamento térmico simples inserida numa habitação, realizado com recurso a dois métodos: um método simplificado baseado na norma ISO 13790 e um método contemplado pela ferramenta de simulação EnergyPlus. O estudo consiste na quantificação dos ganhos solares e das perdas térmicas pela parede de armazenamento, bem como a sua contribuição para a diminuição das necessidades de aquecimento de acordo com o regulamento térmico dos edifícios (RCCTE). São analisadas as repercussões energéticas de diversas soluções construtivas para a parede de armazenamento, bem como o impacto da localização geográfica.

Este estudo demonstra que o método simplificado baseado na norma ISO 13790 tem potencial para ser aplicado ao RCCTE, visto existir concordância com os resultados obtidos pelas simulações efectuadas no EnergyPlus. Na sequência do trabalho realizado é ainda proposto o uso deste método na verificação das exigências térmicas de habitações com paredes de armazenamento, aplicado ao RCCTE, sob a forma de uma folha de cálculo.

Termos chave:

Parede de armazenamento térmico, RCCTE, EnergyPlus, Simulação, Necessidades de aquecimento, Edifícios de habitação.

Abstract

The objective of the present work is the study of a simplified (quasi-steady state) method for the calculation of the energy performance of thermal storage walls for the purposes of thermal regulations, in the area of passive heating systems. It is motivated by the increasing importance of the adoption of alternative energy sources in the current outlook on the energy dependence in fossil fuels (especially oil), regarding space heating and cooling.

In this work various methods for calculating the energy contribution of thermal storage walls in the reduction of the heating needs in residential buildings are studied. The simplified methods are described by the ISO 13790 standard, particularly the energy performance of special elements, which includes various types of thermal storage systems located at the level of building facades.

It is proposed a calculation of the energetic contribution of a simple thermal storage wall inserted in a dwelling, by making use of two methods: a simplified method based on ISO 13790 and a method described by the simulation tool EnergyPlus. The study consists in the quantification of the solar gains and heat losses through the storage wall, as well as its contribution in the reduction of heating needs according to the portuguese thermal regulation of buildings (RCCTE). It is analyzed the energy implications of various constructive solutions to the thermal storage wall, as well as the impact of geographic location.

This study demonstrates that the simplified method based on ISO 13790 has the potential to be applied to the thermal regulation of buildings (RCCTE), since there is concordance with the results obtained by simulations made in EnergyPlus. Following the work done, it is also proposed the use of this method in the verification of the thermal requirements of dwellings with heat storage walls, applied in the portuguese thermal regulation, in the form of a spreadsheet.

Keywords:

Thermal storage wall, RCCTE, EnergyPlus, Simulation, Heating needs, Dwellings.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.1.1. O consumo de energia na Europa e em Portugal.....	1
1.1.2. Regulamentos e iniciativas	2
1.1.3. Potencial dos sistemas solares passivos em Portugal	3
1.2. Hipóteses e pressupostos adoptados.....	3
1.3. Objectivos.....	4
1.4. Organização.....	5
2. PAREDES DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO - MÉTODOS DE CÁLCULO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO	7
2.1. Tipos de paredes de armazenamento térmico.....	7
2.1.1. Parede de armazenamento térmico simples.....	8
2.1.2. Parede de Trombe tradicional.....	10
2.1.3. Parede de água.....	12
2.1.4. Parede de armazenamento térmico com isolamento transparente	12
2.2. Métodos de cálculo simplificados	13
2.2.1. Parede de Trombe tradicional.....	14
2.2.1.1. Perdas térmicas.....	14
2.2.1.2. Ganhos térmicos solares	17
2.2.2. Paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente.....	19
2.2.2.1. Perdas térmicas.....	19
2.2.2.2. Ganhos térmicos solares	19
3. METODOLOGIA DE CÁLCULO	23
3.1. Método simplificado.....	23
3.1.1. Resistência térmica da camada de ar	23
3.1.1.1. Coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção	26
3.1.1.2. Coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação.....	27

3.1.2. Perdas térmicas	28
3.1.3. Ganhos térmicos solares	29
3.2. Método dinâmico - software EnergyPlus	31
3.2.1. Descrição geral do software	32
3.2.2. Modelação da parede de armazenamento	33
3.2.3. Variáveis de saída.....	34
4. CASO DE ESTUDO	35
4.1. Caracterização da habitação	35
4.1.1. Descrição geométrica	35
4.1.2. Soluções construtivas adoptadas	36
4.1.3. Localização.....	37
4.2. Descrição das características da habitação para efeitos do RCCTE.....	37
4.2.1. Dados climáticos	38
4.2.2. Taxa de renovação nominal.....	39
4.2.3. Ganhos térmicos solares	39
4.2.4. Ganhos internos.....	40
4.3. Descrição das características da habitação para efeitos do EnergyPlus	40
4.3.1. Dados climáticos	40
4.3.2. Modelação do Edifício	40
4.3.3. Horários (Schedules)	40
4.3.4. Ganhos Internos.....	41
4.3.5. Taxa de renovação de ar	41
4.3.6. Controlo de temperatura.....	41
4.3.7. Variáveis de saída.....	41
4.4. Descrição das características e do procedimento da análise da parede de armazenamento	42
4.4.1. Definições da parede de armazenamento	42
4.4.2. Condições iniciais da parede de armazenamento	44
4.4.3. Variáveis adoptadas para o estudo	44
5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA HABITAÇÃO.....	47

5.1. Análise da habitação sem parede de armazenamento.....	47
5.1.1. Resultados obtidos pelo RCCTE.....	47
5.1.2. Resultados obtidos pelo EnergyPlus	48
5.1.3. Comparação de resultados.....	48
5.2. Análise da habitação com parede de armazenamento	49
5.2.1. Resultados da resistência térmica da camada de ar	49
5.2.2. Análise da espessura do elemento opaco.....	53
5.2.2.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento.....	53
5.2.2.2. Necessidades nominais de aquecimento.....	56
5.2.3. Análise da espessura da camada de ar.....	61
5.2.3.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento.....	62
5.2.3.2. Necessidades nominais de aquecimento.....	64
5.2.4. Análise do material do elemento opaco.....	69
5.2.4.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento.....	69
5.2.4.2. Necessidades nominais de aquecimento.....	71
6. CONCLUSÕES.....	75
6.1. Validade do método simplificado.....	75
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	77
BIBLIOGRAFIA.....	79
ANEXOS.....	83
Anexo 1 – Inércia térmica da habitação e características térmicas dos materiais utilizados.....	83
Anexo 2 – Folhas de cálculo do RCCTE	87
Anexo 2.1. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Lisboa.....	87
Anexo 2.2. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Porto	91
Anexo 2.3. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Bragança.....	95
Anexo 2.4. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Lisboa.....	99

Anexo 2.5. Folha de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Porto	102
Anexo 2.6. Folha de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Bragança.....	105
Anexo 3 – Folha de cálculo proposta	109
Anexo 4	113
Anexo 4.1. Coeficientes de transmissão térmica, áreas colectoras efectivas e coeficientes de perda de calor da parede de armazenamento térmico.....	113
Anexo 4.2. Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais obtidos pelo método simplificado e pelo método do EnergyPlus.....	115

Índice de Quadros

Quadro 2. 1 - Coeficientes c_j, m para o cálculo do factor solar efectivo do isolamento transparente usando os valores de factor solar para a incidência normal e hemisférica (para paredes verticais).	21
Quadro 4. 1 – Solução construtiva e valor de U da fachada (envolvente exterior).	36
Quadro 4. 2 – Solução construtiva e valor de U da cobertura (envolvente exterior).	36
Quadro 4. 3 – Solução construtiva e valor de U da laje do pavimento (envolvente interior).	37
Quadro 4. 4 – Área e valor de U do vão envidraçado.	37
Quadro 4. 5 – Estações convencionais de aquecimento para as três localizações estudadas.	38
Quadro 4. 6 - Dados climáticos utilizados na estação de aquecimento pelo RCCTE e EnergyPlus para as três localizações em estudo.	39
Quadro 4. 7 - Dados do elemento opaco.	43
Quadro 4. 8 - Características do vão envidraçado da parede de armazenamento.	44
Quadro 4. 9 - Factores solares do envidraçado da parede de armazenamento.	44
Quadro 5. 1 - Ganhos solares e internos, perdas térmicas e necessidades nominais de aquecimento para a situação inicial, para Lisboa, Porto e Bragança - RCCTE.	47
Quadro 5. 2 - Ganhos solares e internos, perdas térmicas e necessidades nominais de aquecimento para a situação inicial, para Lisboa, Porto e Bragança - EnergyPlus.	48
Quadro 5. 3 – Temperaturas médias sazonais das superfícies em contacto com a camada de ar obtidas pelo EnergyPlus.	50
Quadro 5. 4 – Coeficientes de transmissão térmica por radiação – Lisboa, Porto e Bragança.	50
Quadro 5. 5 – Coeficiente de transmissão térmica por convecção – Lisboa, Porto e Bragança.	51
Quadro 5. 6 – Resistências térmicas da camada de ar da parede de armazenamento para as três variáveis em estudo – Lisboa, Porto e Bragança.	53
Quadro 5. 7 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa.	54
Quadro 5. 8 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Porto.	54
Quadro 5. 9 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Bragança.	54
Quadro 5. 10 – Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.	61
Quadro 5. 11 – Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para as três espessuras da camada de ar – Lisboa, Porto e Bragança.	68
Quadro 5. 12 - Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.	74

Quadro 6. 1 – Percentagens médias de redução das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo método “RCCTE modificado” e pelo método do EnergyPlus.....	75
Quadro 6. 2 – Valores médios da diferença percentual entre metodologias para as necessidades nominais de aquecimento.	76
Quadro 6. 3 – Gama de percentagens de redução do índice <i>Nic</i> obtidas pelo método “RCCTE modificado” – Lisboa, Porto e Bragança.....	76

Índice de Figuras

Fig. 1. 1 - Consumo de Energia por utilização final, no sector dos edifícios residenciais da União Europeia.	1
Fig. 2. 1 – Secção transversal de uma parede de armazenamento simples.....	8
Fig. 2. 2 - Exemplo de parede de armazenamento: Casa Oásis, Faro, Algarve (à esquerda); Casa termicamente otimizada, Porto (à direita).	9
Fig. 2. 3 – Exemplo de parede de armazenamento: Centro de visitas do parque nacional Zion, Utah, EUA.....	9
Fig. 2. 4 – Vista exterior da parede de armazenamento térmico simples, Ancona (Itália).....	10
Fig. 2. 5 – Secção transversal de uma parede de Trombe tradicional.	11
Fig. 2. 6 - Exemplo de parede de Trombe: The Solar House, Odeillo, França.	11
Fig. 2. 7 - Exemplo de parede de Trombe: Casa Shäffer, Madeira, Portugal.....	11
Fig. 2. 8 – Secção transversal de uma parede de armazenamento com isolamento transparente.	12
Fig. 2. 9 - Exemplo de isolamento transparente: Tiengen, Alemanha (à esquerda); Universidade de Strathclyde, Glasgow, Escócia (à direita).....	13
Fig. 2. 10 - Quociente entre a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante o período em que a ventilação na camada de ar está activa e a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante todo o período de cálculo (δ), como função do rácio de ganhos/perdas da camada de ar, γal	17
Fig. 2. 11 - Quociente entre a radiação solar total que incide na parede de Trombe durante o período em que há ventilação na camada de ar e a radiação solar total durante todo o período de cálculo (ω), como função de γal	18
Fig. 3. 1 – Diagrama de resistências térmicas da parede de armazenamento.	24
Fig. 4. 1 - Geometria, orientação e descrição das paredes e vão envidraçado da habitação.	35
Fig. 4. 2 - Localização e dimensões da parede de armazenamento.	42
Fig. 5. 1 – Necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo RCCTE e pelo EnergyPlus – Lisboa, Porto e Bragança.	48
Fig. 5. 2 – Resistências térmicas da camada de ar para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.	51
Fig. 5. 3 – Resistência térmica da camada de ar para as três espessuras da camada de ar – Lisboa, Porto e Bragança.	52
Fig. 5. 4 – Resistência térmica da camada de ar para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.	52
Fig. 5. 5 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa.....	55

Fig. 5. 6 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Porto.	55
Fig. 5. 7 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Bragança.....	56
Fig. 5. 8 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Lisboa.	57
Fig. 5. 9 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Porto.	57
Fig. 5. 10 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Bragança.	58
Fig. 5. 11 – Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Lisboa.	59
Fig. 5. 12 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Porto.	59
Fig. 5. 13 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Bragança.	60
Fig. 5. 14 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Lisboa.	62
Fig. 5. 15 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Porto.	63
Fig. 5. 16 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Bragança.	63
Fig. 5. 17 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Lisboa.	64
Fig. 5. 18 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Porto.....	65
Fig. 5. 19 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Bragança.	65
Fig. 5. 20 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Lisboa.	66
Fig. 5. 21 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Porto.	67
Fig. 5. 22 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Bragança.	67
Fig. 5. 23 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.	69

Fig. 5. 24 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Porto.	70
Fig. 5. 25 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.....	70
Fig. 5. 26 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.	71
Fig. 5. 27 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Porto.	72
Fig. 5. 28 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.	72
Fig. 5. 29 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.	73
Fig. 5. 30 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Porto.	73
Fig. 5. 31 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.....	73

Lista de abreviaturas

AQS – Aquecimento de águas sanitárias
ISO – International Organization for Standardization
MIT – Materiais de isolamento transparente
RCCTE – Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios
UE – União Europeia
BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics
DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos da América

Lista de símbolos

A_s – área colectora efectiva (m^2)
 A_p – área de pavimento (m^2)
 e – espessura (m)
 g_{\perp} – factor solar (incidência normal)
GD – graus-dias de aquecimento ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$)
 G_{sul} – energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul na estação de aquecimento ($\text{kW}/m^2 \cdot \text{mês}$)
 H – coeficiente de perda de calor ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
 h_c – coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção ($\text{W}/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 h_r – coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação ($\text{W}/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 I_t – inércia térmica (kg/m^2)
 N_{ic} – necessidades nominais de energia útil para aquecimento ($\text{kW}/m^2 \cdot \text{ano}$)
 Nu – número de Nusselt
 Pr – número de Prandtl
 Ra – número de Rayleigh
 R_{al} – resistência térmica da camada de ar ($m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_i – resistência térmica do elemento opaco ($m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_g – resistência térmica do vidro ($m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_{si} – resistência térmica superficial interior ($m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_{se} – resistência térmica superficial exterior ($m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 U – coeficiente de transmissão térmica ($\text{W}/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 α – coeficiente de absorção
 λ – condutibilidade térmica ($\text{W}/m \cdot ^{\circ}\text{C}$)

τ – coeficiente de transmissão

ε – emitância

β – coeficiente de expansão térmica volumétrica

ν – viscosidade cinemática (m^2/s)

g – aceleração gravítica (m/s^2)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

1.1.1. O consumo de energia na Europa e em Portugal

O sector dos edifícios é responsável por cerca de 40 % do consumo de energia total na União Europeia (UE), sendo que 70% desse consumo destina-se ao sector residencial. O sector dos edifícios é também responsável por 36% das emissões de CO₂ na UE [1]. De acordo com o consumo global de energia do sector residencial apresentado na figura 1.1, 57% destina-se ao aquecimento ambiente, 25% ao aquecimento de água e cerca de 11% a aparelhos eléctricos e iluminação [2]. Estes dados mostram a posição de relevo que o aquecimento ambiente exerce na UE.

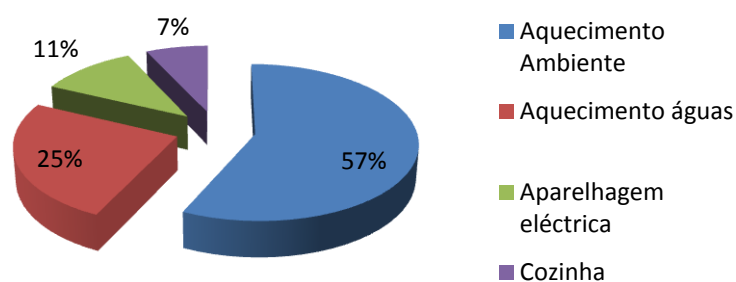


Fig. 1. 1 - Consumo de Energia por utilização final, no sector dos edifícios residenciais da União Europeia [2].

Em Portugal o sector dos edifícios apresentou em 2003 um consumo final de energia de 5,4 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) representando cerca de 29 % do consumo total. O contributo deste sector no consumo final de energia eléctrica foi na ordem dos 60 % [4]. Em 2005, os edifícios foram responsáveis pelo consumo de 5,8 Mtep, representando cerca de 30% do consumo total de energia primária do país e 62% dos consumos de electricidade. O sector residencial doméstico contribuiu com 17% dos consumos de energia primária em termos nacionais, representando cerca de 29% dos consumos de electricidade [5].

É, portanto, crucial reduzir os consumos energéticos no sector dos edifícios, nomeadamente contrariar a crescente tendência do recurso a sistemas de climatização [6]. Com a escalada do preço do petróleo vivida actualmente e as consequências ambientais do seu uso é, mais do que nunca, urgente adoptar soluções energeticamente eficientes e recorrer a fontes de energia alternativas.

Com efeito, numa análise efectuada pela Sociedade Portuguesa da Inovação (SPI) em 2004, é referido um estudo da Comissão Europeia que revela que o total da energia consumida nos edifícios de habitação e de serviços da UE poderia ser reduzido em 50%, através da utilização de tecnologias solares passivas e activas nos edifícios [2].

1.1.2. Regulamentos e iniciativas

Várias iniciativas foram tomadas na tentativa de limitar os consumos energéticos em edifícios. A Directiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD), introduzida em 2002 pela Comissão Europeia (reformulada em 2010), estabelece que os Estados membros da UE devem implementar um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios, aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos [32]. É também exigido que o sistema de certificação abranja igualmente todos os grandes edifícios públicos e edifícios frequentemente visitados pelo público. A Directiva obriga os Estados-Membros da UE a definir normas mínimas de desempenho energético para edifícios novos e remodelados. Esta directiva foi transposta para Portugal em 2006 através de um pacote legislativo composto por três Decretos-lei:

- Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) que transpõe parcialmente para a ordem jurídica a Directiva nº 2002/97/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios;

- Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE);

- Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

Este último impõe, para o sector residencial, requisitos ao projecto de novos edifícios e de grandes remodelações de forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno quer no Verão, impondo limites nos consumos energéticos. No entanto, no que diz respeito ao uso de energias alternativas, o regulamento apenas adopta a obrigatoriedade da contabilização das necessidades de energia para preparação de águas quentes sanitárias (AQS) através de sistemas colectores solares [8]. Torna-se, portanto, de extrema importância estudar a introdução de outros tipos de sistemas colectores que façam uso de energias renováveis.

Outras iniciativas a nível nacional foram desenvolvidas, nomeadamente o Programa para a Eficiência Energética em Edifícios – P3E, promovido pela Direcção-Geral da Empresa (DGE) e apoiado pelo Programa Operacional da Economia (POE), cujo objectivo final é a melhoria da eficiência energética dos edifícios em Portugal.

Este programa definiu um conjunto de actividades estratégicas a desenvolver a curto prazo, de forma a moderar a actual tendência de crescimento dos consumos energéticos nos edifícios e, consequentemente, o nível das emissões dos gases de efeito de estufa (GEE) que lhes são inerentes [9].

A nível europeu, a iniciativa “Passive-On” é um projecto de investigação financiado pelo programa “SAVE Intelligent Energy for Europe”. O projecto tem como objectivo promover casas passivas em climas temperados, nomeadamente no Sul da Europa. Proporciona linhas directrizes de projecto térmico e uma ferramenta de simulação – Pacote de Planeamento de Casa Passiva (PHPP) - para desenvolver casas passivas, economicamente viáveis. A ferramenta consiste numa folha de cálculo usada para determinar os coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos, calcular balanços energéticos e estabelecer taxas de ventilação que originem conforto. As directrizes de projecto propostas para Portugal contemplam, entre outras medidas, o uso de sistemas colectores solares térmicos, não só para aquecimento de águas sanitárias, mas também para aquecimento ambiente [7].

1.1.3. Potencial dos sistemas solares passivos em Portugal

Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar, visto que o número médio anual de horas de Sol varia entre 2200 horas para a zona Norte e 3000 horas para a zona Sul [10]. Como tal, Portugal tem um elevado potencial para fazer uso de sistemas solares passivos. Porém, o regulamento actualmente em vigor não contempla métodos específicos para a contabilização energética deste tipo de sistemas (nomeadamente paredes de armazenamento térmico) de modo a conceber edifícios energeticamente mais eficientes.

1.2. Hipóteses e pressupostos adoptados

Em primeiro lugar, este é um estudo que será direccionado para edifícios de habitação tendo-se escolhido para referência um piso habitacional dotado de cobertura, cujas soluções construtivas pretendem representar as práticas de construção actuais, em conformidade com o regulamento térmico em vigor [8]. Não são contabilizados os efeitos das pontes térmicas.

No seguimento da análise do consumo energético em edifícios habitacionais (na União Europeia e em Portugal) e a lacuna existente no regulamento térmico português (RCCTE) quanto ao impacto de sistemas solares passivos, será estudado o desempenho energético de uma parede de armazenamento térmico simples inserida numa habitação. O estudo para o apuramento das necessidades nominais de aquecimento da habitação (com e sem parede de armazenamento) foi conduzido utilizando duas metodologias distintas:

a) uma simplificada, que utiliza um balanço energético assumidamente estático, característico de um sistema em equilíbrio, em que a transferência de calor se processa em regime quase permanente. A base deste método é o modelo de cálculo do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril de 2006) [8].

b) uma mais precisa, que utiliza um cálculo dinâmico das trocas de calor, ou seja, variável no tempo, que é mais adequado ao que ocorre na realidade. Para tal recorreu-se à utilização do software EnergyPlus, disponibilizado gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América [3].

1.3. Objectivos

Com base nos pressupostos atrás referidos e em hipóteses de cálculo mais específicas que serão enunciadas oportunamente em capítulos mais à frente, o trabalho tem como objectivo principal a determinação dos valores das necessidades nominais de aquecimento de uma habitação dotada de uma parede de armazenamento térmico simples, para efeitos regulamentares.

O estudo consiste na análise do comportamento térmico de paredes de armazenamento térmico através de um método simplificado (em regime quase permanente) baseado no método descrito na norma ISO 13790 para o cálculo dos ganhos solares e perdas térmicas através de paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente [25]. É proposta uma adaptação deste método para paredes de armazenamento térmico simples, cujas diferenças serão referidas mais à frente. O método simplificado adaptado foi aplicado ao modelo de cálculo do RCCTE de forma a apurar as necessidades energéticas da habitação do caso de estudo durante a estação de aquecimento, resultantes da introdução deste sistema passivo. Os objectivos mais específicos são:

- cálculo dos valores de resistência térmica da camada de ar da parede de armazenamento térmico simples;
- cálculo dos valores dos ganhos solares e perdas térmicas através da parede de armazenamento térmico simples, obtidos através do método simplificado e do software EnergyPlus;
- cálculo das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo método de cálculo do RCCTE e pelo software EnergyPlus para a habitação com parede de armazenamento e sem parede de armazenamento.

Os cálculos efectuados correspondem às variações efectuadas. As variações serão a localização - Lisboa, Porto e Bragança - e a solução construtiva da parede de armazenamento térmico - espessura do elemento opaco, espessura da camada de ar e material de armazenamento térmico. Será

feita uma análise de sensibilidade a estes parâmetros, correspondentes às soluções construtivas adoptadas, para as gamas de valores indicados na literatura.

Recorreu-se a simulações efectuadas através do software EnergyPlus com o objectivo de validar os resultados obtidos através do método simplificado adoptado e verificar a sua adequabilidade para o clima de Portugal, bem como ao regulamento térmico dos edifícios (RCCTE).

Posteriormente, os resultados obtidos por ambas as metodologias serão objecto de análise crítica e comparativa de todas as variações efectuadas.

1.4. Organização

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos e quatro anexos.

No capítulo 1 é feito um enquadramento do tema e a apresentação das hipóteses e pressupostos adoptados. São também apresentados os objectivos propostos e a organização do presente trabalho.

No capítulo 2 são abordados os diferentes tipos de paredes de armazenamento térmico. São também descritos métodos simplificados para o cálculo do desempenho térmico destes sistemas passivos de aquecimento.

No capítulo 3 é descrito o método simplificado adoptado para o cálculo da contabilização energética de paredes de armazenamento térmico simples em edifícios de habitação. Foi também abordada a metodologia de cálculo de simulação dinâmica do software EnergyPlus, à qual se recorreu para comparar os resultados obtidos pelo método simplificado.

No capítulo 4 é tratado o caso de estudo. Numa primeira fase são descritas as características e os pressupostos adoptados para as metodologias do RCCTE e do EnergyPlus na análise do comportamento térmico da habitação. Posteriormente, é feita uma caracterização da habitação com uma parede de armazenamento e são apresentados os procedimentos de análise para os dois métodos em estudo (método simplificado aplicado ao RCCTE e o método do EnergyPlus).

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos acompanhados das análises necessárias. Numa primeira fase são analisados os resultados obtidos para as necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo RCCTE e pelo EnergyPlus para a situação inicial, isto é, para a habitação sem parede de armazenamento. De seguida são analisados os valores obtidos para as resistências térmicas da camada de ar da parede de armazenamento térmico simples para as variáveis e localizações estudadas. Por fim é analisado o comportamento térmico da habitação após a introdução da parede de armazenamento, através da comparação de resultados obtidos pelas duas metodologias (método simplificado e método do EnergyPlus).

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais do trabalho e são referidas algumas propostas para desenvolvimento futuro.

2. PAREDES DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO - MÉTODOS DE CÁLCULO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

No presente capítulo é feita uma descrição dos sistemas solares passivos integrados em fachada, bem como os respectivos princípios de funcionamento e exemplos de aplicação. No caso das paredes de armazenamento térmico simples são também apresentados os resultados de alguns estudos sobre o desempenho energético em edifícios. São também expostos os métodos simplificados para o cálculo do desempenho energético dos referidos sistemas.

2.1. Tipos de paredes de armazenamento térmico

As paredes de armazenamento térmico são sistemas passivos de climatização de ganho indirecto. Os sistemas passivos podem ser definidos como métodos, processos ou dispositivos construtivos integrados nos edifícios cuja função é a de contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento natural, através da transferência ou armazenamento de calor sem auxílio de fontes não renováveis [11]. Dentro dos sistemas passivos encontram-se os denominados sistemas de ganho indirecto ou desfasado onde numa zona intermédia entre a superfície de ganho (superfície exposta à radiação solar) e o espaço a aquecer é introduzida massa térmica que irá absorver e armazenar a energia solar nela incidente, sendo posteriormente transferida para o interior do edifício [12].

Estes sistemas são compostos por uma parede maciça de espessura entre os 10cm e os 30 cm orientada a Sul (hemisfério Norte), que funciona como material de armazenamento térmico (materiais densos como o betão, pedra, e tijolo maciço ou contentores de água ou outros líquidos), cuja superfície exterior é geralmente pintada de cor escura de forma a maximizar a captação de radiação solar incidente. Exteriormente é colocado um vão envidraçado deixando, entre a parede e o vão, um espaço de ar (geralmente entre os 5 e os 20cm) onde predomina o efeito de estufa, dando origem a correntes de convecção devido às elevadas temperaturas alcançadas [13]. A estrutura que suporta o vão envidraçado é geralmente feita de metal ou madeira de modo a suportar as elevadas temperaturas a que irá estar submetida [15].

Durante a estação de aquecimento, uma parcela da radiação de onda curta (radiação solar) atravessa o elemento transparente (vidro ou materiais de isolamento transparente) e alcança a superfície de ganho que, por sua vez, emite radiação de onda longa. Esta radiação permanece no interior da camada de ar uma vez que o elemento transparente funciona como barreira para as radiações de onda longa. De forma a minimizar os ganhos térmicos durante a estação de arrefecimento e possível sobreaquecimento no interior do edifício é aconselhável a utilização de palas horizontais situadas por cima da parede de armazenamento térmico, bem como dispositivos de protecção solar móveis (estores, por exemplo).

As paredes de armazenamento térmico ou paredes acumuladoras são designadas, em sentido lato, por paredes de Trombe (em alusão ao pioneiro no estudo deste tipo de sistemas, Félix Trombe [14]). Estas estão divididas em três tipos: parede de armazenamento térmico simples, parede de Trombe e parede de água. Podem ainda ser revestidas exteriormente por materiais de isolamento transparente em vez de vidro.

2.1.1. Parede de armazenamento térmico simples

Na sua forma mais simples, o espaço de ar entre a superfície de ganhos e o envidraçado é completamente estanque e não existem quaisquer aberturas para o interior do edifício, como se apresenta na figura 2.1. Este sistema é designado por parede de armazenamento térmico simples [13], parede de Trombe passiva [16] ou parede de Trombe não ventilada [17].

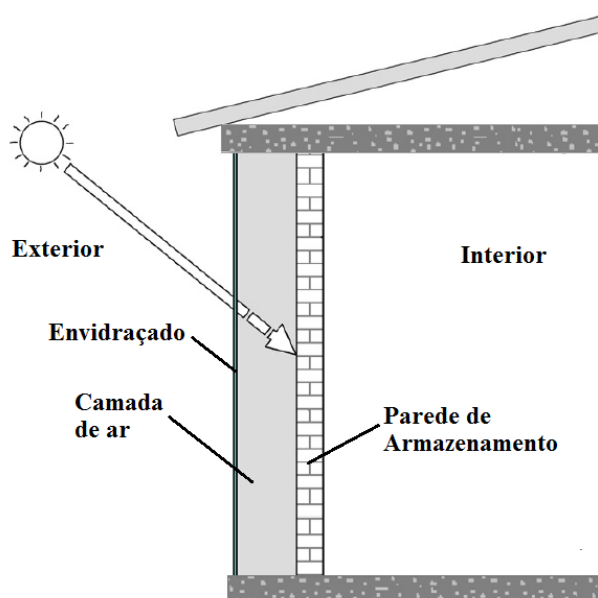


Fig. 2. 1 – Secção transversal de uma parede de armazenamento térmico simples.

Neste caso, a energia solar que é absorvida pela massa térmica é transmitida para o interior do edifício, de forma desfasada, por condução através do material de armazenamento térmico (betão, pedra, tijolo maciço, etc.). Após alcançar a superfície interior da parede, a energia é transmitida para o espaço aquecido por convecção e radiação. A energia solar é captada pela superfície exterior da parede (superfície de ganho) durante o dia e libertada para o interior do edifício à noite, durante as horas mais frias. Na figura 2.2 são apresentados dois exemplos de aplicação deste sistema solar passivo em Portugal.



Fig. 2. 2 - Exemplo de parede de armazenamento: Casa Oásis, Faro, Algarve (à esquerda) [21]; Casa termicamente otimizada, Porto (à direita) [22].

Na figura 2.3 é apresentado o edifício do centro de visitas do parque nacional de *Zion*, nos Estados Unidos da América. Este edifício de serviços dispõe de uma parede de armazenamento térmico simples, orientada a Sul, com uma área de $68,7 \text{ m}^2$, perfazendo 44% da área total da fachada Sul. A parede de armazenamento possui material de armazenamento térmico composto por betão com 20 cm de espessura. A camada de ar tem uma espessura de 5 cm e o envidraçado tem 4 mm de espessura. O desempenho energético deste edifício foi monitorizado e analisado ao longo de um período de dois anos para a respectiva estação de aquecimento, através do método desenvolvido por *Torcellini* (2004) [35]. A energia térmica fornecida pela parede de armazenamento foi determinada com base nos métodos de cálculo de fluxos de calor publicados por *Balcomb* em 1980 [36]. Durante a estação de aquecimento de 2001-2002 a parede de armazenamento deste edifício contribuiu para a redução da energia total usada para o aquecimento ambiente em 20% [34].



Fig. 2. 3 – Exemplo de parede de armazenamento: Centro de visitas do parque nacional Zion, Utah, EUA [34].

Um estudo efectuado em Ancona (Itália) concluiu que este tipo de sistemas pode, de facto, contribuir para a redução das necessidades de aquecimento em climas mediterrâneos (caso de Portugal).

Neste estudo foi analisada a introdução de uma parede de armazenamento num edifício residencial e o impacto energético desta na redução das necessidades de aquecimento [38]. A parede de armazenamento térmico simples em causa consiste numa parede de betão com 40cm de espessura e uma camada de ar de 10cm (figura 2.4). A superfície exterior da parede foi pintada de preto de forma a maximizar os ganhos solares. O estudo consistiu na análise do comportamento térmico da parede de armazenamento através de simulações efectuadas no software EnergyPlus. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de ensaios experimentais, alcançados através de medições das temperaturas superficiais e fluxos de calor da parede de armazenamento térmico, revelando desvios na ordem dos 5-10%. Este estudo concluiu que as necessidades nominais de aquecimento do edifício foram reduzidas em 12,2%.



Fig. 2. 4 – Vista exterior da parede de armazenamento térmico simples, Ancona (Itália) [38].

2.1.2. Parede de Trombe tradicional

Este sistema pode ser designado por parede de Trombe tradicional [13], parede de Trombe activa [16] ou parede de Trombe ventilada [17]. A diferença entre este sistema e a parede de armazenamento térmico simples reside no facto de parte da energia solar incidente ser transferida de imediato para o interior do espaço a aquecer por intermédio da ventilação natural através de orifícios existentes na parede. Esta ventilação resulta de correntes de convecção natural, induzida pelo efeito “termosifão” no espaço de ar entre o envidraçado e a superfície exterior da parede. Como resultado, o ar aquecido ascende e entra no espaço a aquecer pela abertura superior e o ar frio sai pela abertura inferior [13]. A restante energia será absorvida pela superfície exterior da parede e transmitida por condução através desta. Ao chegar à superfície interior da parede, o espaço interior é aquecido por convecção e radiação.

Na figura 2.5 é apresentada a secção transversal de uma parede de Trombe tradicional onde é possível observar-se o percurso do ar aquecido no interior da camada de ar.

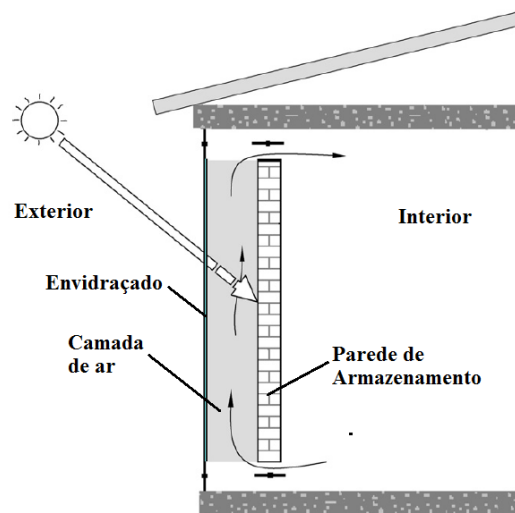


Fig. 2. 5 – Secção transversal de uma parede de Trombe tradicional.

Na figura 2.6 é apresentado um exemplo de um edifício com uma parede de Trombe incorporada na fachada Sul, situado em Odeillo, França. Neste caso, a parede de Trombe ocupa a totalidade da fachada orientada a Sul.



Fig. 2. 6 - Exemplo de parede de Trombe: The Solar House, Odeillo, França [20].

A figura 2.7 apresenta um exemplo da aplicação de paredes de Trombe em Portugal, mais precisamente em Porto Santo, na Madeira. O material de armazenamento térmico adoptado é a pedra.



Fig. 2. 7 - Exemplo de parede de Trombe: Casa Shäffer, Madeira, Portugal [24].

2.1.3. Parede de água

Trata-se de um sistema semelhante ao de uma parede de armazenamento térmico, sendo que água ou outro líquido é armazenado em contentores estanques de cor escura. Nestes sistemas, o calor resultante da incidência da radiação solar é transmitido para o espaço a aquecer por radiação e convecção. Devido ao seu elevado calor específico, a água tem uma capacidade de armazenamento térmico cinco vezes superior ao do betão, sendo que é necessário apenas 1/5 da massa de água em comparação com o betão [12]. A desvantagem deste tipo de sistemas reside numa maior manutenção e monitorização, nomeadamente dos contentores de armazenamento, de modo a evitar fugas de líquido e possíveis infiltrações.

2.1.4. Parede de armazenamento térmico com isolamento transparente

Alternativamente ao uso de vidro como material exterior é possível usar materiais de isolamento transparente (MIT). Os MIT são estruturas feitas de vidro (múltiplas camadas) ou materiais plásticos (estruturas com cavidades ou capilaridades). Foram concebidos para serem usados em colectores solares onde há a necessidade de aumentar o isolamento do colector sem reduzir drasticamente o coeficiente de transmissão de energia solar.

A disposição deste tipo de sistemas pode ser observada através da secção transversal apresentada na figura 2.8.

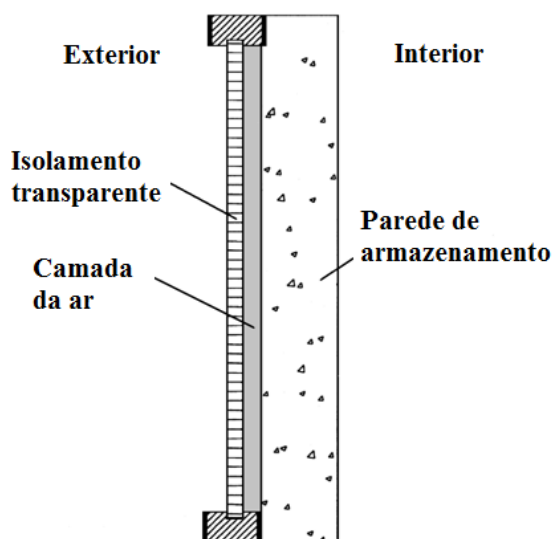


Fig. 2. 8 – Secção transversal de uma parede de armazenamento térmico com isolamento transparente.

Estes materiais proporcionam isolamento térmico contra as perdas de calor superior ao vidro simples e elevados coeficientes de transmissão de radiação solar [18]. A combinação destas

propriedades é possível pois os MIT são transmissores de radiação de onda curta (radiação solar) mas funcionam como barreira para as radiações de onda longa (radiação emitida pela superfície de ganho). Assim, a radiação de onda curta atravessa os materiais de isolamento transparente e a radiação de onda longa é isolada entre a superfície de ganho e a superfície interior dos materiais de isolamento transparente. A energia solar incidente que chega ao MIT é reflectida e re-reflectida dentro do material e eventualmente alcança a superfície de ganho [16].

Na figura 2.9 é possível observar dois exemplos de aplicação de paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente: à esquerda é apresentado um edifício residencial em Tiengen (Alemanha), e à direita uma universidade em Glasgow (Escócia).



Fig. 2. 9 - Exemplo de isolamento transparente: Tiengen, Alemanha (à esquerda); Universidade de Strathclyde, Glasgow, Escócia (à direita) [23].

2.2. Métodos de cálculo simplificados

A avaliação do desempenho energético de edifícios tornou-se obrigatória na União Europeia após a introdução da directiva EPBD em 2002 pela Comissão Europeia, como se referiu anteriormente. Consequentemente, uma série de normas surgiram com o objectivo de delinear uma metodologia de cálculo comum que abrangesse vários países europeus. Nesse sentido foi desenvolvida a norma ISO/FDIS 13790:2007 para o cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento [25], em que se baseia o método de cálculo do RCCTE. Os métodos de cálculo de ganhos solares e perdas térmicas descritos na norma ISO 13790, tal como na metodologia do RCCTE, baseiam-se em balanços energéticos mensais ou sazonais determinados em regime quase permanente. Os efeitos dinâmicos são tidos em conta com a introdução de um factor de utilização. Os factores de utilização representam a porção dos ganhos (durante a estação de aquecimento) ou de perdas (durante a estação de arrefecimento) que contribuem para a redução das necessidades de aquecimento (durante a estação de aquecimento) ou das necessidades de arrefecimento (durante a estação de arrefecimento) [26].

As metodologias a seguir descritas contabilizam os ganhos solares e as perdas térmicas de paredes de armazenamento. Recorre-se aos métodos de cálculo descritos na norma ISO 13790 para o cálculo das perdas de calor e ganhos térmicos solares de elementos especiais – Anexo E [25]. Estas

metodologias aplicam-se a paredes de Trombe tradicionais (ventiladas) e a paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente.

2.2.1. Parede de Trombe tradicional

Como foi referido anteriormente, as paredes de Trombe ventiladas são sistemas em que os ganhos térmicos processam-se por meio de convecção (através de orifícios na parede) e por condução (através do material de armazenamento térmico). De seguida são descritos os procedimentos de cálculo das perdas térmicas e ganhos solares para este tipo de sistemas.

2.2.1.1. Perdas térmicas

As paredes de Trombe ventiladas são tratadas como elementos de fachada opacos, no que respeita às perdas térmicas [25]. As perdas de calor totais através da parede de Trombe ventilada, Q_l , são calculadas de acordo com a expressão:

$$Q_l = H \cdot GD \cdot 0,024 \text{ (kW} \cdot \text{h)} \quad (2.1)$$

em que o factor multiplicativo 0,024 faz a conversão da unidade de potência, *Watt*, para a unidade de energia, *Watt.hora*, e desta para *kilowatt.hora*, pela multiplicação de 24 horas por 0,001. GD é o número de graus-dias de aquecimento e H representa o coeficiente de perdas de calor da parede de Trombe ventilada. Este coeficiente resulta da soma de duas parcelas: o coeficiente de perdas de calor da parede de Trombe não ventilada (H_0) e o coeficiente de perdas de calor adicional (ΔH):

$$H = H_0 + \Delta H \text{ (W / } ^\circ\text{C)} \quad (2.2)$$

O coeficiente de perdas de calor para a parede não ventilada (H_0 , em $\text{W / } ^\circ\text{C}$) é calculado de acordo com os pressupostos da norma EN ISO 13789 para elementos correntes, incluindo possíveis pontes térmicas [27]. O coeficiente de perdas de calor adicional, ΔH , refere-se às perdas térmicas pela camada de ar devido à ventilação. Este coeficiente é calculado através da seguinte expressão:

$$\Delta H = \rho_a c_a \cdot q_v \cdot \left(\frac{U_e}{U_i} \right)^2 \cdot \delta \cdot k_{sw} \text{ (W / } ^\circ\text{C)} \quad (2.3)$$

em que:

$\rho_a c_a$ – capacidade calorífica do ar, por unidade de volume (em $W \cdot h / m^3 \cdot ^\circ C$);

q_v – fluxo de ar através da camada de ar, por unidade de tempo (em m^3 / h);

U_i – coeficiente de transmissão térmica interior (em $W / m^2 \cdot ^\circ C$);

U_e – coeficiente de transmissão térmica exterior (em $W / m^2 \cdot ^\circ C$);

δ – quociente entre a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante o período em que a ventilação da camada de ar está activa, e a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante todo o período de cálculo.

O factor k_{sw} é determinado recorrendo à expressão 2.10. Os coeficientes de transmissão térmica interior e exterior são calculados através das expressões 2.5 e 2.6, respectivamente:

$$U_i = \frac{I}{R_i + \frac{R_{al}}{2}} \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2.5)$$

$$U_e = \frac{1}{R_e + \frac{R_{al}}{2}} \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2.6)$$

em que:

R_i – resistência térmica interior da parede, entre a camada de ar e o ambiente interior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_e – resistência térmica exterior da parede, entre a camada de ar e o ambiente exterior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{al} – resistência térmica da camada de ar (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$).

A resistência térmica interior da parede (R_i) resulta da soma da resistência térmica do elemento opaco e da resistência térmica superficial interior (R_{si}). A resistência térmica exterior da parede (R_e) resulta da soma da resistência térmica do envidraçado e da resistência térmica superficial exterior (R_{se}). O coeficiente δ (presente na equação 2.3) é obtido pelo gráfico da figura 2.10 ou pela expressão:

$$\delta = 0,3 \cdot \gamma_{al} + 0,03 \cdot (0,003^{\gamma_{al}} - 1) \quad (2.7)$$

em que γ_{al} é o rácio entre os ganhos térmicos solares ($Q_{gn,sw}$) e as perdas térmicas da camada de ar ($Q_{ht,al}$) durante o período de cálculo. O fluxo dos ganhos térmicos solares da camada de ar durante o período de cálculo, $Q_{gn,sw}$, é calculado através da expressão:

$$Q_{gn,sw} = I_w \cdot A_{sw} \quad (W) \quad (2.8)$$

em que I_w é o fluxo de radiação solar que incide sobre a parede (em W/m^2) e A_{sw} é a área da parede de Trombe (em m^2). O fluxo das perdas térmicas através da camada de ar durante o período de cálculo, $Q_{ht,al}$, determina-se através da expressão:

$$Q_{ht,al} = U_e \cdot A_{sw} \cdot (T_i - T_e) \quad (W) \quad (2.9)$$

em que $(T_i - T_e)$ é a diferença de temperaturas interior e exterior.

O factor k_{sw} (presente na equação 2.3) é definido de acordo com a expressão:

$$k_{sw} = 1 - \exp \left[- \frac{A_{sw} \cdot Z}{\rho_a c_a \cdot q_v} \right] \quad (2.10)$$

em que o parâmetro Z é definido através da expressão:

$$\frac{1}{Z} = \frac{h_r}{h_c \cdot (2h_r + h_c)} + \frac{1}{U_i + U_e} \quad (2.11)$$

onde h_r é o coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação e h_c é o coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção. U_i e U_e são os coeficientes de transmissão térmica interior e exterior e são determinados pelas expressões 2.5 e 2.6, respectivamente.

Os parâmetros definidos para as perdas térmicas - U_i , U_e , q_v e k_{sw} - são também utilizados no cálculo dos ganhos térmicos solares, nomeadamente na determinação da área colectora efectiva da parede de Trombe ventilada.

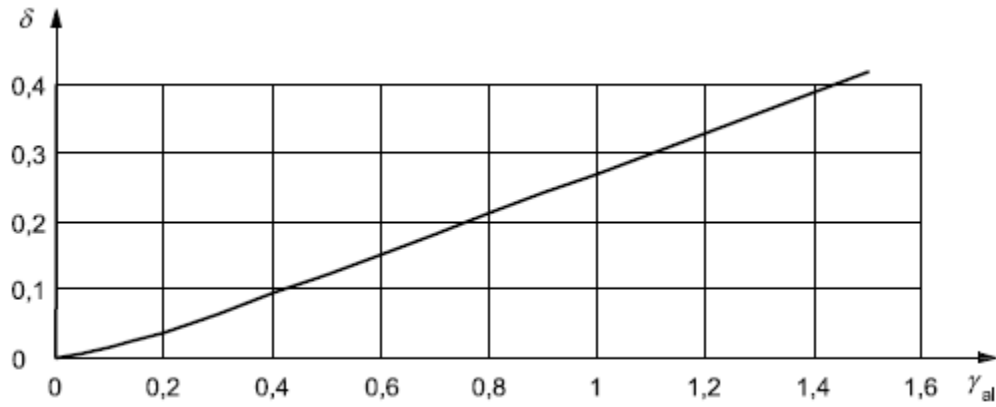


Fig. 2. 10 - Quociente entre a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante o período em que a ventilação na camada de ar está activa e a diferença acumulada de temperaturas interior e exterior durante todo o período de cálculo (δ), como função do rácio de ganhos/perdas da camada de ar, γ_{al} [25].

2.2.1.2. Ganhos térmicos solares

Os ganhos térmicos solares de paredes de Trombe ventiladas são contabilizados tal como no método de cálculo do RCCTE para a determinação dos ganhos solares brutos através dos envidraçados [29]. Para efeitos regulamentares, estes ganhos são adicionados aos outros ganhos solares. Os ganhos térmicos solares brutos determinam-se de acordo com a expressão:

$$Q_g = G_{sul} \cdot X_j \cdot n \cdot \sum A_s \quad (kW \cdot h) \quad (2.12)$$

em que:

G_{sul} – radiação incidente num envidraçado a Sul (em $kW \cdot h / m^2 \cdot mês$);

X_j – factor de orientação para as diferentes exposições;

n – duração da estação de aquecimento (em meses);

A_s – área colectora efectiva da parede de Trombe.

A área colectora efectiva da parede de Trombe (A_s) é determinada recorrendo à expressão:

$$A_s = A_{sw} \cdot \alpha \cdot F_s \cdot F_g \cdot g_{\perp} \cdot \left(U \cdot R_e + \frac{U^2 \cdot R_i}{U_i \cdot U_e} \cdot \rho_a c_a \cdot \frac{q_v}{A_{sw}} \cdot k_{sw} \cdot \omega \right) \quad (m^2) \quad (2.13)$$

em que:

A_{sw} – área total da parede de Trombe (em m^2);

α – coeficiente de absorção da superfície exterior do elemento opaco;

g_{\perp} – factor solar (incidência normal) do envidraçado que cobre a camada de ar;

F_s – factor de obstrução;

F_g – fracção da área da parede coberta por caixilharia;

U – coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe (em $W/m^2 \cdot ^\circ C$);

R_i – resistência térmica interior da parede, entre a camada de ar e o ambiente interior (em $m^2 \cdot ^\circ C/W$);

ω – quociente entre a radiação solar total que incide na parede de Trombe durante o período em que a ventilação na camada de ar está activa e a radiação solar total durante todo o período de cálculo.

Analisando a parcela entre parêntesis da expressão 2.13, observa-se que a primeira parte da soma diz respeito aos ganhos térmicos por condução, enquanto que a segunda parte diz respeito aos ganhos térmicos por ventilação.

O coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe (U) é calculado através da expressão:

$$U = \frac{1}{R_i + R_{al} + R_e} \left(W/m^2 \cdot ^\circ C \right) \quad (2.14)$$

O coeficiente ω é obtido através da figura 2.11 ou pela expressão:

$$\omega = 1 - \exp(-2,2 \cdot \gamma_{al}) \quad (2.15)$$

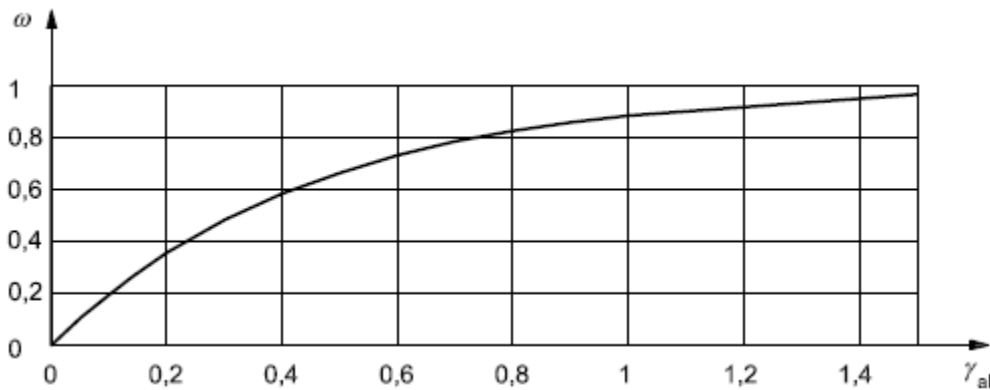


Fig. 2.11 - Quociente entre a radiação solar total que incide na parede de Trombe durante o período em que há ventilação na camada de ar e a radiação solar total durante todo o período de cálculo (ω), como função de γ_{al} [25].

De notar que neste procedimento está implícito que as equações 2.13 e 2.15 devem ser usadas num processo iterativo para calcular os ganhos térmicos solares, começando com o valor $\gamma_{al} = 1$.

2.2.2. Paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente

As paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente assemelham-se a paredes de armazenamento térmico simples, recorrendo a materiais de isolamento transparente em vez de envidraçados simples. A diferença reside no cálculo do factor solar que, neste caso, determina-se a partir do factor solar efectivo (g_t), composto pelo factor solar de incidência hemisférica ($g_{t,hem}$) e pelo factor solar de incidência normal ($g_{t,\perp}$). Estes factores são facultados pelos fabricantes mediante fichas técnicas, ou determinados experimentalmente. O factor solar efectivo é obtido para cada mês e depende da orientação da parede. Este parâmetro é determinado recorrendo-se a coeficientes tabelados no quadro 2.1, que afectam os valores do factor solar de incidência normal ($g_{t,\perp}$) consoante o mês do ano.

2.2.2.1. Perdas térmicas

Para o cálculo das perdas de calor, as paredes com isolamento transparente são tratadas como elementos opacos construtivos de fachada. O coeficiente de perda de calor por transmissão do elemento, H , é calculado de acordo com a norma EN ISO 13789 para elementos correntes, incluindo possíveis pontes térmicas [27]. As perdas de calor totais pela parede de armazenamento com isolamento transparente, Q_l , são calculadas de forma idêntica ao procedimento para a parede de Trombe ventilada, de acordo com equação 2.1.

2.2.2.2. Ganhos térmicos solares

Os ganhos térmicos solares são contabilizados como ganhos solares através de vãos envidraçados [25]. Estes ganhos são calculados usando a área colectora efectiva da parede com isolamento transparente. A área colectora efectiva para a orientação j é:

$$A_{sj} = \alpha \cdot A \cdot F_S \cdot F_F \cdot \frac{U}{U_{te}} \cdot g_t \quad (2.16)$$

em que:

α - coeficiente de absorção, do elemento opaco atrás do isolamento transparente;

A - área total da parede (em m^2);

F_S - factor de obstrução. Varia entre 0 e 1 e representa a redução na radiação solar que incide no vão envidraçado devido ao sombreamento permanente causado por diferentes obstáculos;

F_F - fracção coberta por isolamento transparente. Traduz a redução da transmissão da energia solar associada à existência de caixilharia;

U - coeficiente de transmissão térmica do elemento (em $W / m^2 \cdot ^\circ C$);

U_{te} - coeficiente de transmissão térmica exterior do elemento (em $W / m^2 \cdot ^\circ C$);

g_t - factor solar efectivo do isolamento transparente.

O factor de redução de área coberta por isolamento transparente devido à caixilharia (F_F) determina-se recorrendo à expressão:

$$F_F = \frac{A_t}{A} \quad (2.17)$$

onde A_t é a área da parede coberta por isolamento transparente. Os coeficientes de transmissão térmica do elemento - U - e de transmissão térmica exterior do elemento - U_{te} (da superfície exterior do elemento opaco para o ambiente exterior) - são determinados pelas seguintes expressões:

$$U = \frac{1}{R_{se} + R_t + R_{al} + R_i + R_{si}} \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2.18)$$

$$U_{te} = \frac{1}{R_{se} + R_t + R_{al}} \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2.19)$$

em que:

R_i - resistência térmica do elemento opaco atrás do isolamento transparente (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_t - resistência térmica do isolamento transparente (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{al} - resistência térmica da camada de ar entre o elemento opaco e o isolamento transparente (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{si} - resistência térmica superficial interior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{se} – resistência térmica superficial exterior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$).

O cálculo do factor solar efectivo (g_t) depende do tipo de isolamento transparente. Tem em conta o ângulo de incidência da radiação solar directa, usando os coeficientes $c_{j,m}$ do quadro 2.1:

Quadro 2. 1 - Coeficientes $c_{j,m}$ para o cálculo do factor solar efectivo do isolamento transparente usando os valores de factor solar para a incidência normal e hemisférica (para paredes verticais) [25].

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
S	-0,105	-0,067	-0,023	0,042	0,073	0,089	0,062	0,005	-0,054	-0,093	-0,105
SO/SE	-0,034	-0,027	-0,010	0,002	0,022	0,037	0,013	-0,015	-0,025	-0,034	-0,260
O/E	0,054	0,033	0,016	-0,012	-0,005	-0,002	-0,007	-0,001	0,024	0,049	0,052
NE/NO	0,002	0,008	0,016	0,030	0,018	0,013	0,024	0,033	0,014	0,004	0,000
N	0,000	0,000	0,000	0,011	0,021	0,042	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000

O factor solar para a orientação j e mês m é expresso pela equação:

$$g_{tj,m} = (g_{t,hem} - c_{j,m} \cdot g_{t,\perp}) \quad (2.20)$$

Em que $g_{t,\perp}$ é o factor solar de incidência normal e $g_{t,hem}$ é o factor solar de incidência hemisférica - difusa do isolamento transparente. O factor solar efectivo (g_t) resulta da soma dos factores solares calculados para cada mês da estação de aquecimento ($g_{tj,m}$). Os ganhos solares brutos são calculados de acordo com a expressão 2.12, e adicionados aos outros ganhos solares.

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Neste capítulo é abordada a metodologia de cálculo usada para determinar o desempenho energético de paredes de armazenamento térmico simples em habitações. Na realidade recorre-se a duas metodologias de cálculo correspondentes a duas naturezas de comportamento distintas: estática e dinâmica. A metodologia estática corresponde ao procedimento de cálculo indicado pela norma ISO 13790 adaptado ao caso de estudo. Este procedimento, que determina os ganhos solares e perdas térmicas pela parede de armazenamento, é incluído na metodologia do RCCTE de forma a calcular as necessidades nominais de aquecimento da habitação¹. O método dinâmico corresponde ao método de cálculo do EnergyPlus, no qual é contemplada a análise dinâmica do comportamento térmico de paredes de armazenamento em habitações, com o objectivo de validar o método simplificado adoptado.

3.1. Método simplificado

O método de cálculo adoptado para contabilizar a contribuição energética de paredes de armazenamento térmico simples é baseado no método descrito no capítulo 2 (2.2.2. Paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente). Para tal, é necessário adaptá-lo para o uso de vidro em vez de materiais de isolamento transparente. A diferença reside no cálculo do factor solar. Uma vez que se trata de vidro é necessário determinar apenas o factor solar de incidência normal (g_{\perp})². Este factor é determinado de acordo com o modelo de cálculo do RCCTE para vãos envidraçados na situação de Inverno [29]. Para efeitos do caso em estudo, o factor solar é determinado através da ferramenta de simulação EnergyPlus de modo a obter resultados mais próximos do que acontece na realidade e fazer comparações mais fidedignas com o método de cálculo do EnergyPlus. O procedimento de cálculo recorre a equações semelhantes cujas diferenças são indicadas mais à frente.

3.1.1. Resistência térmica da camada de ar

Para determinar a resistência térmica da camada de ar recorre-se ao modelo do comportamento térmico de paredes de armazenamento [33]. Este modelo, desenvolvido através do Método das Diferenças Finitas (MDF), foi validado através de ensaios experimentais [37]. O princípio de funcionamento da transferência de calor da parede de armazenamento simples é apresentado na figura 3.1, na forma de um diagrama analógico de resistências térmicas:

¹ No anexo 3 são apresentados os passos a seguir para o procedimento de cálculo.

² À semelhança do que se observa no método de cálculo para paredes de Trombe ventiladas (equação 2.13).

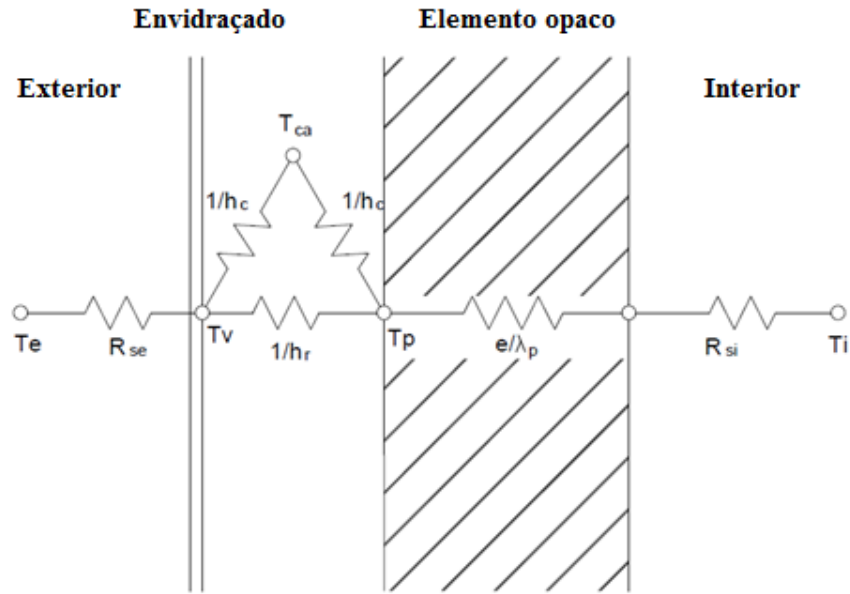


Fig. 3. 1 – Diagrama de resistências térmicas da parede de armazenamento [33].

em que:

T_e – temperatura exterior (em $^{\circ}C$);

R_{se} – resistência térmica superficial exterior (em $m^2 \cdot ^{\circ}C / W$);

T_v – temperatura superficial interior do vidro (em $^{\circ}C$);

T_p – temperatura superficial exterior da parede (em $^{\circ}C$);

T_{ca} – temperatura da camada de ar (em $^{\circ}C$);

e – espessura da parede (em m);

λ_p – condutibilidade térmica da parede (em $W / m \cdot ^{\circ}C$);

R_{si} – resistência térmica superficial interior (em $m^2 \cdot ^{\circ}C / W$);

T_i – temperatura interior (em $^{\circ}C$);

h_r – coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação (em $W / m^2 \cdot ^{\circ}C$);

h_c – coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção (em $W / m^2 \cdot ^{\circ}C$).

A resistência térmica da camada de ar pode ser deduzida através do balanço energético entre as duas superfícies em contacto com a camada de ar, recorrendo-se aos coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção e por radiação.

O balanço energético na superfície interior do vidro é dado pela equação:

$$q_v = h_{se} \cdot (T_e - T_v) + \phi_{sv} = \frac{h_r + h_c}{2} \cdot (T_v - T_p) \left(W/m^2 \right) \quad (3.1)$$

em que:

q_v – fluxo de calor na superfície interior do vidro (em W/m^2);

h_{se} – coeficiente de transmissão térmica superficial exterior (em $W/m^2 \cdot ^\circ C$);

ϕ_{sv} – fluxo de energia solar absorvido pelo vidro (em W/m^2).

O coeficiente transmissão térmica superficial exterior é também o inverso da resistência térmica superficial exterior (R_{se}). A equação 3.1 traduz como se processam as trocas de calor entre o vidro e o ambiente exterior através do coeficiente de transmissão térmica superficial exterior, e entre o vidro e o interior (camada de ar) através dos coeficientes de transmissão térmica superficial por radiação e convecção.

O balanço energético na superfície exterior da parede de armazenamento é dado pela equação:

$$q_p = -\lambda_p \cdot \frac{dT}{dx} = \left(\frac{h_r + h_c}{2} \right) \cdot (T_v - T_p) + \phi_{sp} \left(W/m^2 \right) \quad (3.2)$$

em que:

q_p – fluxo de calor na superfície exterior da parede (em W/m^2);

$\frac{dT}{dx}$ – gradiente de temperatura (em $^\circ C/m$);

ϕ_{sp} – fluxo de energia solar absorvido pela parede de armazenamento (em W/m^2);

λ_p – condutibilidade térmica da parede (em $W/m \cdot ^\circ C$).

Esta equação mostra como se realiza a transferência de energia térmica da superfície exterior da parede de armazenamento com a camada de ar através dos coeficientes de transmissão térmica superficial por radiação e por convecção, e com o interior da parede de armazenamento por condução.

O sentido do fluxo de calor é determinado pelas temperaturas das duas superfícies em contacto com a camada de ar. Os fluxos de energia solar (quando disponíveis) absorvidos pelas duas superfícies (ϕ_{sv} e ϕ_{sp}) contribuem para o aumento das respectivas temperaturas superficiais (T_v e T_p).

Analisando as equações 3.1 e 3.2, é possível observar que a transferência de calor entre as duas superfícies em contacto com a camada de ar processa-se através da média entre o coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção e o coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação. Assim, a resistência térmica da camada de ar obtém-se através do inverso do coeficiente de transmissão térmica superficial global, ou seja:

$$R_{al} = \frac{1}{\left(\frac{h_r + h_c}{2} \right)} \left(m^2 \cdot ^\circ C / W \right) \quad (3.3)$$

3.1.1.1. Coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção

A transmissão de energia térmica por convecção (associada à transmissão entre um fluido e uma superfície sólida) ocorre devido ao movimento das partículas desse mesmo fluido. A equação que descreve este fenómeno, referida em [39], foi estabelecida por Newton em 1701 e consiste na taxa de transferência de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido. Esta taxa, proporcional à área considerada e à diferença de temperatura estabelecida, é expressa por:

$$Q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (W) \quad (3.4)$$

em que:

h_c – coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção (em $W / m^2 \cdot ^\circ C$);

A – área em contacto com o fluido (em m^2);

$(T_s - T_f)$ – diferença de temperatura entre o sólido e o fluido (em $^\circ C$).

No caso em estudo, o coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção é obtido através de simulações no EnergyPlus (valores médios sazonais) para as diferentes soluções construtivas da parede de armazenamento e zonas climáticas. O objectivo é obter resultados mais próximos do que acontece na realidade e fazer comparações mais fidedignas com o método de cálculo do EnergyPlus. O método para a obtenção deste coeficiente é apresentado mais à frente neste capítulo.

3.1.1.2. Coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação

A radiação emitida por um corpo negro (corpo radiante puro) é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann, referida em [39], através da expressão:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ (W)} \quad (3.5)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann (de valor $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) e T é a temperatura absoluta do corpo negro, em *Kelvin*. Para o caso de um corpo real (ou não negro), as trocas de calor por radiação dependem da emissividade (ε) da superfície do corpo. A emissividade de uma superfície é definida como o quociente entre a energia emitida pelo corpo real e a energia emitida pelo corpo negro à mesma temperatura, tomando valores entre 0 e 1. O fluxo de calor por radiação nesta situação obtém-se através da expressão 3.6, referida em [39]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ (W)} \quad (3.6)$$

No caso de duas superfícies paralelas (aplicável a paredes duplas, envidraçados duplos e também a camadas de ar de paredes de armazenamento térmico simples) é necessário ter em conta as emissividades das superfícies dos dois corpos. Nesta situação o fluxo de calor é dado pela expressão 3.7, referida em [39]:

$$Q = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ (W)} \quad (3.7)$$

A equação 3.7 pode ser expressa pela seguinte equação, correspondente à lei de Newton para a transferência de calor por radiação entre duas superfícies:

$$Q = A \cdot h_r \cdot (T_1 - T_2) \text{ (W)} \quad (3.8)$$

Em que h_r é o coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação, dado pela expressão:

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ (W / m}^2 \cdot \text{°C)} \quad (3.9)$$

Como o EnergyPlus não calcula valores exactos para o coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação, este é determinado através da expressão 3.9. Para efeitos no caso de estudo, T_1 representa a temperatura da superfície interior do vidro ($T_{v,abs}$) e T_2 representa a temperatura da superfície exterior da parede de armazenamento ($T_{p,abs}$), ambas em graus *Kelvin*. As temperaturas das superfícies em contacto com a camada de ar são obtidas através de simulações no EnergyPlus para as diferentes soluções construtivas da parede de armazenamento e zonas climáticas em estudo. ε_1 representa a emissividade da superfície interior do vidro e ε_2 a emissividade da superfície exterior da parede de armazenamento. No caso em estudo, todos os materiais utilizados pressupõem um valor de emissividade de 0,9 (tal como foi definido nas simulações do EnergyPlus).

3.1.2. Perdas térmicas

Tal como no método descrito no capítulo 2 (2.2.2. Paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente), a parede de armazenamento é tratada como elemento opaco de fachada normal. A contabilização das perdas de calor através da parede de armazenamento efectua-se tal como é descrito pelo RCCTE [25]. O coeficiente de perda de calor por transmissão do elemento, H , é calculado de acordo com a norma ISO 13789, para elementos correntes [27]:

$$H = U \cdot A \text{ (W / } ^\circ\text{C)} \quad (3.10)$$

Em que A (em m^2) é a área, medida pelo interior, da parede de armazenamento e U (em $W / m^2 \cdot ^\circ\text{C}$) é o coeficiente de transmissão térmica da parede de armazenamento. Este coeficiente é calculado recorrendo à expressão 3.11. A diferença entre esta equação e a equivalente do método para paredes com isolamento transparente reside no uso do coeficiente R_g (resistência térmica do vidro) em vez do coeficiente R_t (resistência térmica do isolamento transparente):

$$U = \frac{1}{R_{se} + R_g + R_{al} + R_i + R_{si}} \text{ (W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (3.11)$$

em que:

R_i – resistência térmica do elemento opaco atrás do envidraçado (em $m^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$);

R_g – resistência térmica do vidro (em $m^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$);

R_{al} – resistência térmica da camada de ar (fechada) entre o elemento opaco e o envidraçado (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{si} – resistência térmica superficial interior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$);

R_{se} – resistência térmica superficial exterior (em $m^2 \cdot ^\circ C / W$).

As resistências térmicas superficiais (interior e exterior) são obtidas recorrendo ao ITE 50 [28].

Para efeitos regulamentares, as perdas térmicas através da parede de armazenamento são contabilizadas pelo coeficiente de perda de calor (H), introduzido no somatório do coeficiente global de perdas do edifício na folha de cálculo FCIV.2 do RCCTE. As perdas de calor por elementos do edifício em contacto com o exterior (Q_{ext}), incluindo a parede de armazenamento, são calculadas pela expressão:

$$Q_{ext} = \left(\sum_i H_i + H \right) \cdot GD \cdot 0,024 \text{ (kW} \cdot \text{h)} \quad (3.12)$$

em que:

H_i – coeficiente de perda de calor do elemento i em contacto com o exterior (em $W / ^\circ C$);

H – coeficiente de perda de calor da parede de armazenamento (em $W / ^\circ C$);

GD – número de graus-dias de aquecimento especificado para cada concelho (em $^\circ C \cdot dia$).

3.1.3. Ganhos térmicos solares

Tal como foi descrito pelo método de cálculo para a parede de armazenamento térmico com isolamento transparente (capítulo 2), os ganhos térmicos pela parede de armazenamento térmico simples são contabilizados como ganhos solares através de vãos envidraçados [29]. Estes ganhos são obtidos através da determinação da área colectora efectiva. Assim, o cálculo desta área resulta da equação da área colectora efectiva para paredes com isolamento transparente (Equação 2.16) adaptada ao vidro como elemento exterior da parede. As diferenças residem na substituição de F_F por F_g e g_t por g_\perp . A área colectora efectiva para a orientação j é:

$$A_{sj} = \alpha \cdot A \cdot F_s \cdot F_g \cdot g_\perp \cdot \frac{U}{U_e} \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.13)$$

em que:

A – área total da parede de armazenamento coberta por vidro, incluindo caixilharia (em m^2);

F_s – factor de obstrução. Varia entre 0 e 1 e representa a redução na radiação solar que incide no vão envidraçado devido ao sombreamento permanente causado por diferentes obstáculos;

α – coeficiente de absorção (radiação solar) da superfície exterior do elemento opaco;

g_{\perp} – factor solar (incidência normal) do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado. Representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado e radiação solar incidente na direcção normal ao envidraçado;

F_g – fracção envidraçada. Traduz a redução da transmissão da energia solar associada à existência de caixilharia, sendo dada pela relação entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado;

U – coeficiente de transmissão térmica da parede de armazenamento (em $W/m^2 \cdot ^\circ C$);

U_e – coeficiente de transmissão térmica exterior da parede de armazenamento (em $W/m^2 \cdot ^\circ C$).

O quociente U/U_e traduz o factor de eficiência do sistema passivo, tomando valores inferiores a 1.

O valor do factor solar (incidência normal) - g_{\perp} - é obtido através de simulações no software EnergyPlus, uma vez que o objectivo é comparar os resultados obtidos pelo método simplificado com as simulações efectuadas no EnergyPlus. O coeficiente de transmissão térmica da parede de armazenamento (U) é calculado recorrendo à expressão 3.11. O coeficiente de transmissão térmica exterior do elemento, da superfície exterior do elemento opaco para o ambiente exterior (U_e) é calculado através da seguinte expressão:

$$U_e = \frac{1}{R_{se} + R_g + R_{al}} \left(W/m^2 \cdot ^\circ C \right) \quad (3.14)$$

A diferença da equação 3.14 para a equivalente do método de paredes de armazenamento térmico com isolamento transparente (equação 2.19) reside na utilização de R_g em vez de R_t .

Os ganhos térmicos são contabilizados como ganhos solares de vãos envidraçados normais [25], de acordo com a expressão 2.12.

Para efeitos regulamentares, os ganhos térmicos através da parede de armazenamento são adicionados aos outros ganhos solares na folha de cálculo FCIV.1e do RCCTE.

3.2. Método dinâmico - software EnergyPlus

Como forma de validar o método simplificado para calcular o desempenho térmico de paredes de armazenamento, recorre-se à ferramenta de simulação dinâmica EnergyPlus. O valor do coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção das superfícies em contacto com a camada de ar e as respectivas temperaturas superficiais (de forma a calcular o coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação) também são obtidos com o recurso a esta ferramenta. Através destes dois coeficientes é calculada a resistência térmica da camada de ar.

O algoritmo da parede de Trombe usado no EnergyPlus é específico para modelar a convecção numa "zona de parede de Trombe", ou seja, o espaço de ar entre a superfície exterior da parede de armazenamento e a superfície interior do vidro. Este algoritmo calcula os coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção para o ar numa cavidade estreita vertical fechada e não ventilada. Aplica-se tanto para o espaço de ar entre painéis de uma janela ou para o espaço de ar entre o vidro da parede Trombe e a superfície exterior da parede (geralmente uma superfície de cor escura) [16]. A correlação usada pelo EnergyPlus, validada experimentalmente por *Ellis* [17], determina o número de *Nusselt* para coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção para cavidades verticais através das seguintes expressões [31]:

$$Nu_1 = 0,0673838 \cdot Ra^{1/3} , 5 \times 10^4 < Ra < 10^6 \quad (3.15)$$

$$Nu_1 = 0,028154 \cdot Ra^{0,4134} , 10^4 < Ra < 5 \times 10^4 \quad (3.16)$$

$$Nu_1 = 1 + 1,7596678 \times 10^{-10} \cdot Ra^{2,2984755} , Ra \leq 10^4 \quad (3.17)$$

$$Nu_2 = 0,242 \cdot \left(\frac{Ra}{a} \right)^{0,272} \quad (3.18)$$

$$Nu = Máx (Nu_1, Nu_2) \quad (3.19)$$

Em que o parâmetro a é a razão entre a altura (H) e a espessura da camada de ar (L), e Ra é o número de *Rayleigh*, dado pela seguinte expressão 3.20, referida em [17]:

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (3.20)$$

O número de *Prandtl* (Pr) para o ar, que assume-se suficientemente constante para a gama de temperaturas normal em edifícios, toma o valor de 0,71. Gr é o número de *Grashof*, que depende da espessura e das temperaturas das superfícies interiores da camada de ar, referido em [17]:

$$Gr \equiv \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.21)$$

Assim, o coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção, h_c , é expresso pela equação 3.22, referida em [17]:

$$h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad (3.22)$$

Em que λ é a condutibilidade térmica do ar e L é o espaço entre as duas superfícies em contacto com a camada de ar.

3.2.1. Descrição geral do software

O software EnergyPlus é um programa de simulação energética de edifícios concebido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Tem origem nos programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2 [3]. Esta ferramenta tem vindo a evoluir desde a sua criação em 2001, sendo que a sua última actualização se encontra na versão 6 (versão usada neste trabalho). O seu desenvolvimento deve-se ao aumento da necessidade de se recorrer a uma ferramenta que assegure soluções integradas que incluam não só o cálculo de perdas térmicas mas também um estudo mais detalhado do impacto dos sistemas de climatização e ventilação nos consumos energéticos totais de um edifício.

O EnergyPlus serve fundamentalmente como motor de simulação de fluxos térmicos e análise energética, baseando-se na descrição do edifício na perspectiva geométrica e construtiva, introduzida pelo utilizador. Os dados de entrada para simulação são criados e editados pela interface “IDF editor” através de um ficheiro IDF (Input Data File). Para além do ficheiro IDF é necessário inserir um arquivo de dados climáticos de extensão “.epw” (EnergyPlus Weather File). Os dados de saída são obtidos efectuando a simulação através da interface “EP Launch”, onde também se define o ficheiro climático EPW. Através desta informação, o EnergyPlus determina as necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento inerentes a determinados padrões de conforto térmico, definidos pelo utilizador, através de variáveis da saída.

Um dos pontos fortes do EnergyPlus reside na integração de todos os aspectos relacionados com uma simulação energética de um edifício: perdas térmicas, centros de produção de energia térmica e sistemas de ventilação/renovação do ar. O cálculo é feito de modo a que seja tido em conta o impacto dos sistemas na resposta térmica do edifício em vez de calcular primeiro as perdas térmicas e depois aplicar soluções de climatização ao processo.

O funcionamento de uma simulação no EnergyPlus é organizado através de cinco “gestores”: gestor da simulação, gestor da solução integrada, gestor do balanço energético da superfície, gestor do balanço de energia ao ar e gestor de simulação dos sistemas do edifício. O EnergyPlus realiza simulações integradas, isto é, o cálculo de perdas térmicas nas zonas bem como os sistemas de tratamento de ar e ventilação e os centros de produção de energia térmica são calculados simultaneamente e a sua interacção é tida em conta. O método de cálculo fundamental baseia-se no balanço de energia no qual a temperatura do ar contido dentro dos espaços é considerada uniforme.

O gestor do balanço energético das superfícies é o responsável pelo balanço de energia em cada superfície, considerando os efeitos de condução, convecção e radiação. O gestor do balanço de energia ao ar lida com todas as correntes de ar envolvidas, tais como ventilação, infiltração e exaustão de ar. Este módulo tem em conta a perda térmica do ar em cada espaço e avalia os ganhos térmicos por convecção. A informação recolhida após o balanço energético estar concluído (para um intervalo de tempo entre uma hora e 15 minutos) é transmitida ao gestor de simulação dos sistemas do edifício que controla a simulação do sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e sistemas eléctricos.

De modo a obter uma solução fisicamente realista todos os elementos são integrados e controlados pelo gestor da solução integrada. O esquema de solução simultânea recorre ao cálculo iterativo de modo a fazer coincidir a procura em termos de perdas térmicas nas zonas a serem tratadas, com o fornecimento por parte dos centros de produção térmica e tratamento de ar novo.

Para realizar uma simulação no EnergyPlus é necessário, inicialmente, modelar a geometria e os componentes construtivos do edifício. A definição da geometria é realizada através de coordenadas cartesianas. Os componentes construtivos são tratados como “layers”, ou seja, é necessário criar cada camada constituinte. O EnergyPlus permite que sejam criados “schedules” de controlo, ou seja, horários de funcionamento das diversas características do edifício, nomeadamente o controlo da ventilação e das temperaturas, sistemas de isolamento nocturno, funcionamento do equipamento eléctrico e da iluminação, ocupação de pessoas, etc.

3.2.2. Modelação da parede de armazenamento

Para simular a parede de Trombe, uma zona muito estreita é acoplada à superfície desejada mediante uma partição interzonal. A profundidade da zona corresponde à espessura da camada de ar

pretendida. É crucial certificar-se que o campo “Solar Distribution” no objecto “Building” está definido para “FullInteriorAndExterior” para que a maioria do fluxo solar seja direccionado para a superfície absorvedora da parede e não apenas para uma pequena área do chão da zona de Trombe.

Também o campo “Zone Inside Convection Algorithm” do objecto “Zone” da zona de Trombe deverá ser definido para “TrombeWall” de modo a modelar correctamente o espaço de ar. Tal como em todos os casos de partições interzonais, a construção da parede da zona adjacente deverá ser simétrica em relação à construção da parede da zona de Trombe.

Os materiais usados para a parede de armazenamento são definidos no campo “Materials” e as soluções construtivas definidas no campo “Construction”, tal como os restantes elementos da envolvente do edifício. As soluções construtivas adoptadas para a parede de armazenamento são apresentadas no capítulo 4.

3.2.3. Variáveis de saída

Para o apuramento dos ganhos térmicos solares e perdas térmicas através da parede de armazenamento é necessário definir as variáveis de saída no campo “Output:variable” [19]. As variáveis “Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Gain” e “Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Loss” devolvem os ganhos e perdas de calor por condução, respectivamente. Estas são aplicadas à superfície interior da parede de armazenamento na zona 1 (zona da habitação).

É também definida a variável “Surface Int Convection Coeff” que, aplicada a uma das superfícies interiores em contacto com a camada de ar devolve o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial por convecção entre essas superfícies. As temperaturas das superfícies em contacto com a camada de ar são obtidas através da variável “Surface Inside Temperature”, para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação. É através destes dois coeficientes que se determina a resistência da camada de ar.

Os resultados destas variáveis de saída foram obtidos através de simulações sazonais (para as soluções construtivas da parede de armazenamento e localizações geográficas em estudo) e são expostos no capítulo 5.

4. CASO DE ESTUDO

Este capítulo divide-se em quatro subcapítulos. No primeiro subcapítulo é feita uma descrição das características gerais da habitação na qual se irá inserir uma parede de armazenamento. Nos dois subcapítulos posteriores é efectuada uma descrição das características da habitação para efeitos de cálculo do RCCTE e do EnergyPlus, respectivamente. No quarto e último subcapítulo é feita uma caracterização da habitação com uma parede de armazenamento e são apresentados os procedimentos de análise para os dois métodos em estudo (RCCTE e EnergyPlus). Para efeitos regulamentares, o desempenho energético da parede de armazenamento na habitação é contabilizado através da introdução do método simplificado no método de cálculo do RCCTE, de acordo com o que se apresenta no capítulo 3.

4.1. Caracterização da habitação

4.1.1. Descrição geométrica

Apresenta-se na figura 4.1 as características geométricas da habitação do caso de estudo.

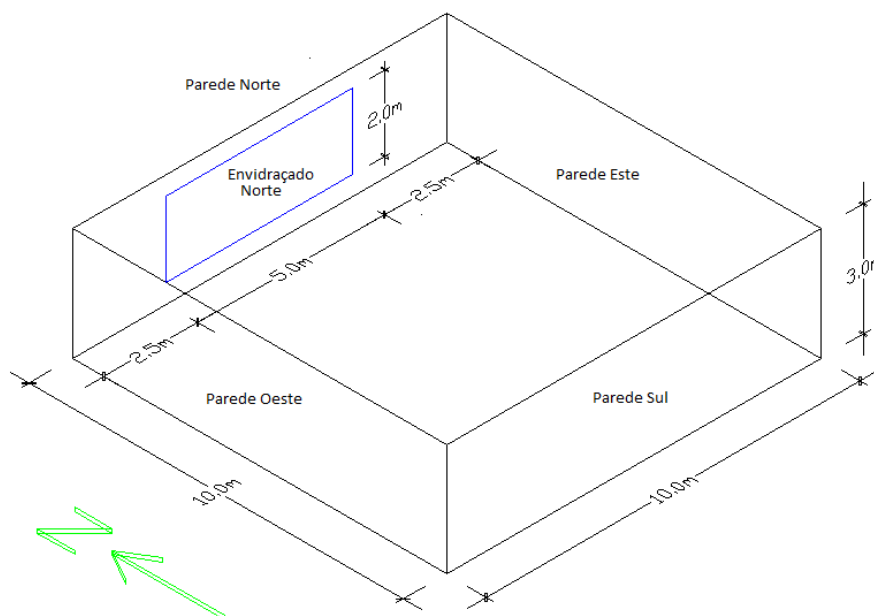


Fig. 4. 1 - Geometria, orientação e descrição das paredes e vão envidraçado da habitação.

A habitação a analisar consiste num piso de um edifício com pé direito de 3 metros, com uma área de pavimento de 100 metros quadrados (fachadas com 10 metros de largura).

Uma das fachadas está orientada a Sul, de modo a acomodar uma parede de armazenamento térmico com o melhor desempenho energético possível. A fachada Norte possui um vão envidraçado com 2 metros de altura por 5 metros de largura. A habitação é dotada de uma cobertura e a laje de pavimento considera-se sobre uma zona aquecida.

4.1.2. Soluções construtivas adoptadas

As soluções construtivas adoptadas para a envolvente do edifício são representativas da prática construtiva actual em Portugal. Nos quadros 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as soluções construtivas utilizadas no caso de estudo e respectivos coeficientes de transmissão térmica.

Quadro 4. 1 – Solução construtiva e valor de U da fachada (envolvente exterior).

No.	Camada	espessura (m)	λ (W/m. °C)	R (m ² . °C/W)
1	Reboco	0,015	1,3	0,012
2	Pano interior alvenaria	0,11	0,275	0,400
3	Isolamento térmico (EPS)	0,05	0,04	1,250
4	Pano exterior alvenaria	0,11	0,275	0,360
5	Reboco	0,015	1,3	0,012
	TOTAL	0,30		2,03
	R_{si} (m ² . °C/W)	0,13		
	R_{se} (m ² . °C/W)	0,04		
			U = 0,45 W/m ² . °C	

Quadro 4. 2 – Solução construtiva e valor de U da cobertura (envolvente exterior).

No.	Camada	espessura (m)	λ (W/m. °C)	R (m ² . °C/W)
1	Lajetas	0,05	0,3125	0,160
2	Isolamento térmico (XPS)	0,06	0,037	1,622
3	Impermeabilização	0,003	0,023	0,130
4	Betonilha	0,1	1,65	0,061
5	Laje de betão armado	0,15	2	0,075
6	Reboco	0,03	1,30	0,02
	TOTAL	0,39		2,07
	R_{si} (m ² . °C/W)	0,17		
	R_{se} (m ² . °C/W)	0,17		
			U = 0,69 W/m ² . °C	

Quadro 4. 3 – Solução construtiva e valor de U da laje do pavimento (envolvente interior).

No.	Camada	espessura (m)	λ (W/m. °C)	R ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
1	Ladrilho cerâmico	0,01	0,5	0,020
2	Betonilha	0,04	1,65	0,024
3	Laje de betão armado	0,15	2	0,075
4	Isolamento térmico (EPS)	0,1	0,04	2,500
5	Reboco	0,03	1,3	0,023
	TOTAL	0,33		2,64
	R_{si} ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	0,17		
	R_{se} ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	0,13		
			$U = 0,34 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$	

O vão envidraçado é constituído por um vidro duplo (5mm de espessura) com uma camada de ar de 1,6mm de espessura. A caixilharia é metálica sem corte térmico com 10cm de largura, tendo protecção solar exterior do tipo estore. O valor do coeficiente de transmissão térmica é apresentado no quadro 4.4:

Quadro 4. 4 – Área e valor de U do vão envidraçado.

Vãos envidraçados exteriores	Área (m^2)	U ($W/m \cdot ^\circ C$)	U.A ($W/^\circ C$)
Verticais:			
Envidraçado Norte (Parede Norte):	10,00	2,73	27,30

4.1.3. Localização

A habitação em estudo foi analisada em três zonas climáticas de Inverno distintas que cobrem a totalidade do território nacional continental: I1, I2 e I3. Na zona climática I1 a localização escolhida é Lisboa. Para a zona climática I2 escolheu-se a zona do Porto e Bragança é a localidade estudada para a zona climática I3.

4.2. Descrição das características da habitação para efeitos do RCCTE

Nesta secção é feita uma descrição das características e do funcionamento da habitação recorrendo-se à metodologia do RCCTE para calcular as necessidades nominais de aquecimento. O edifício possui uma inércia térmica forte, como se pode constatar através da consulta do Anexo 1.

4.2.1. Dados climáticos

Para cada uma das zonas climáticas de Inverno analisadas foi feito um levantamento dos dados climáticos. De acordo com a definição de estação convencional de aquecimento³ disposta no RCCTE e através do estudo dos dados climáticos fornecidos para cada localização pela base de dados do EnergyPlus, foram determinados os referidos períodos convencionais de aquecimento (quadro 4.5).

Quadro 4. 5 – Estações convencionais de aquecimento para as três localizações estudadas.

	Lisboa	Porto	Bragança
Primeiro decêndio	11 de Novembro a 20 de Novembro	4 de Outubro a 13 de Outubro	30 de Outubro a 8 de Novembro
Último decêndio	14 de Março a 23 de Março	3 de Maio a 12 de Maio	19 de Maio a 28 de Maio
Período convencional de aquecimento	11 de Novembro a 23 de Março	4 de Outubro a 12 de Maio	30 de Outubro a 28 de Maio

O quadro 4.6 apresenta os dados climáticos para as duas metodologias relativos à estação de aquecimento. Para a zona climática do Porto, ao substituir os 1610 °C.*dias* por 1809 °C.*dias* nas folhas de cálculo do RCCTE, apesar dos pequenos aumentos de energia solar incidente e da duração da estação de aquecimento (que contribuem para a parcela dos ganhos), isso não impede o aumento das necessidades nominais de aquecimento. Tendo em conta que a temperatura média interior utilizando a metodologia do EnergyPlus é de aproximadamente 20 °C (a mesma utilizada na metodologia do RCCTE), a energia necessária para manter a temperatura média interior tende a ser semelhante nos dois casos. Os mesmos princípios aplicam-se na análise das restantes localizações. Em termos práticos, o uso dos dados climáticos obtidos pelo EnergyPlus não originam diferenças significativas quando comparados com os dados climáticos preconizados pelo RCCTE. Contudo, para efeitos de comparação entre as duas metodologias, optou-se por utilizar os dados climáticos obtidos pelo EnergyPlus nas folhas de cálculo do método do RCCTE para as situações da habitação com e sem parede de armazenamento.

³ *Período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de Outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com fim no último decêndio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C.*

Quadro 4. 6 - Dados climáticos utilizados na estação de aquecimento pelo RCCTE e EnergyPlus para as três localizações em estudo.

	Lisboa		Porto		Bragança	
	RCCTE	EnergyPlus	RCCTE	EnergyPlus	RCCTE	EnergyPlus
Zona Climática de Inverno	I1		I2		I3	
Radiação incidente (G_{sul}) ($kW \cdot h/m^2 \cdot mês$)	108	99,27	93	93,86	90	95,27
Duração da estação de aquecimento (M) (meses)	5,3	4,4	6,7	7,3	8	6,9
Graus-dias de aquecimento (GD) ($^{\circ}C \cdot dias$)	1190	1128	1610	1809	2850	2509

4.2.2. Taxa de renovação nominal

Tal como é preconizado pelo regulamento térmico português, foi definida uma taxa de renovação de ar de 0,6 rph (renovações por hora) na folha de cálculo FCIV.1d (referente às perdas térmicas por ventilação).

4.2.3. Ganhos térmicos solares

Para calcular os ganhos térmicos solares do vão envidraçado da fachada Norte da habitação é necessário definir uma série de factores.

O factor solar de incidência normal (g_{\perp}) do vão envidraçado foi retirado da simulação do EnergyPlus e toma o valor de 0,78. Mais uma vez, utilizou-se o valor determinado pelo EnergyPlus de modo a poder comparar os dois métodos. O factor de sombreamento do horizonte (F_h) toma o valor de 1, visto se situar no octante Norte.

O factor de sombreamento dos elementos horizontais toma o valor de 1, dado que o vão envidraçado não dispõe de palas horizontais.

O factor de sombreamento por elementos verticais adjacentes ou sobrepostos ao vão envidraçado toma também o valor de um, visto este se situar no octante Norte. Por se tratar de uma janela de alumínio com caixilho sem quadrícula, o factor da fracção envidraçada (F_g) toma o valor de 0,70 (de acordo com o RCCTE [29]). O factor de correcção da selectividade angular (F_w) toma o valor de 0,9 para envidraçados duplos correntes [29].

O factor de orientação X_j toma o valor de 0,27, uma vez que o vão envidraçado localiza-se no octante Norte [29].

Os resultados dos ganhos solares brutos podem ser consultados no anexo 2, para Lisboa, Porto e Bragança.

4.2.4. Ganhos internos

Os ganhos internos médios foram definidos para 4 W/m^2 , de acordo com o regulamento térmico português [29]. Estes ganhos foram contabilizados na folha de cálculo FCIV.1e (referente aos ganhos úteis na estação de aquecimento).

4.3. Descrição das características da habitação para efeitos do EnergyPlus

Nesta secção é feito um levantamento das características e do funcionamento da habitação para a análise do comportamento térmico através da ferramenta de simulação EnergyPlus, relativamente ao cálculo das necessidades nominais de aquecimento.

4.3.1. Dados climáticos

Foram efectuadas simulações para três as zonas climáticas que compreendem o território nacional: Lisboa (I1), Porto (I2) e Bragança (I3). Para tal foram usados os respectivos ficheiros de dados climáticos [30]. As estações de aquecimento e respectivos dados climáticos (para as três localizações em estudo) utilizadas para as simulações no EnergyPlus são apresentados no quadro 4.5 e 4.6, respectivamente.

4.3.2. Modelação do Edifício

Na classe “Building” foram definidos os campos “Terrain” como “City” e “Solar Distribution” como “FullInteriorAndExterior”. O primeiro define a localização da habitação em ambiente citadino e o segundo estabelece que a radiação solar transmitida se distribui por todas as superfícies de uma zona. Na classe “Construction” foram definidos os objectos para a fachada exterior, vão envidraçado Norte, laje de pavimento e laje de cobertura. As respectivas soluções construtivas são as mesmas usadas para a metodologia do RCCTE. As características térmicas dos materiais foram definidas na classe “Material”, e são as mesmas usadas na metodologia do RCCTE [28]. A lista de materiais utilizados pode ser consultada no anexo 1.

4.3.3. Horários (Schedules)

Nesta classe foram definidos 5 objectos. Para garantir que a temperatura no interior da habitação não toma valores inferiores a 20°C , foi criado um horário que controla a temperatura

interior. Criou-se também um objecto de modo a definir o horário que controla a taxa de renovação de ar da habitação. O funcionamento do dispositivo móvel de sombreamento do vão envidraçado da fachada Norte foi também temporizado. O dispositivo de sombreamento é desactivado das 8h00 às 20h00. Foi também definido um objecto que controla o funcionamento do equipamento eléctrico da habitação.

4.3.4. Ganhos Internos

Na classe “ElectricEquipment” foi definido um objecto que quantifica os ganhos térmicos internos da habitação, cujo valor é definido para 4 W/m^2 . Este valor corresponde aos ganhos internos médios contabilizados pelo RCCTE e inclui qualquer fonte de calor situada no espaço a aquecer, excluindo o sistema de aquecimento [29]. Os ganhos internos representam os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e calor dissipado pelos equipamentos e dispositivos de iluminação.

4.3.5. Taxa de renovação de ar

Na classe “ZoneInfiltration:DesignFlowRate” foi definido o campo correspondente às perdas por infiltrações. Este define a taxa de renovação de ar de 0,6 rph, tal como na metodologia do RCCTE [8].

4.3.6. Controlo de temperatura

Na classe “ZoneControl:Thermostat” foi definido um objecto que, através do campo “ThermostatSetpoint:SingleHeating”, garante que a temperatura no interior da habitação não toma valores abaixo de 20 °C. De forma a contabilizar a energia utilizada durante o período de simulação para o aquecimento da habitação, foi definido um objecto na classe “ZoneHVAC:IdealLoadsSystem”.

4.3.7. Variáveis de saída

Os resultados das simulações efectuadas no EnergyPlus são obtidos através de variáveis de saída de acordo com o intervalo de tempo pretendido [19]. No caso em estudo pretende-se obter valores médios para as estações de aquecimento. Para tal, definiu-se o período de simulação (“Reporting Frequency”) para “Run Period” (correspondendo às estações de aquecimento das zonas em estudo) na classe “Output:Variable”.

A variável “Ideal Loads Air Heating Energy” contabiliza as necessidades nominais de aquecimento. A temperatura exterior é determinada através da variável “Outdoor Dry Bulb”, enquanto que a variável “Zone Mean Air Temperature” devolve a temperatura interior média da habitação. Para contabilizar os ganhos e as perdas pelos vãos envidraçados recorreu-se às variáveis “Zone Window Heat Gain” e “Zone Window Heat Loss”, respectivamente. Os ganhos e as perdas por infiltração foram obtidas recorrendo às variáveis “Zone Infiltration Sensible Heat Gain” e “Zone Infiltration Sensible Heat Loss”, respectivamente. Os ganhos internos foram obtidos através da variável “Zone Air Balance Internal Convective Gains Rate”.

Os resultados obtidos para as variáveis de saída anteriormente descritas são apresentados no capítulo 5.

4.4. Descrição das características e do procedimento da análise da parede de armazenamento

4.4.1. Definições da parede de armazenamento

A parede de armazenamento térmico adoptada para este estudo fica situada na fachada Sul da habitação de modo a maximizar os ganhos solares, como se apresenta na figura 4.2.

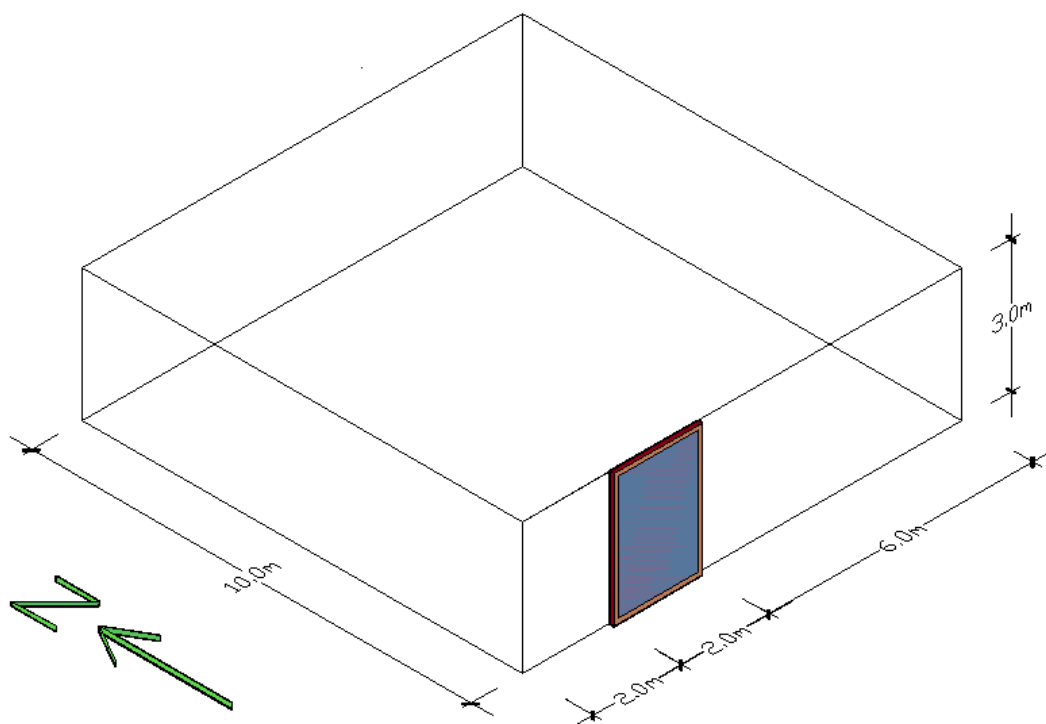


Fig. 4. 2 - Localização e dimensões da parede de armazenamento.

É constituída por uma parede de material pesado revestido exteriormente com pintura preta. Tem uma caixilharia em madeira de pinheiro (madeira densa) acoplada, que suporta o envidraçado na parte exterior e é completamente estanque. As soluções construtivas da parede de armazenamento adoptadas para o estudo são apresentadas mais à frente neste capítulo.

É necessário ter algum cuidado no dimensionamento da parede de armazenamento, pois o sobredimensionamento desta pode levar ao aumento da temperatura ambiente interior para níveis acima dos desejáveis, comprometendo o conforto térmico. Para o caso de estudo, a parede de armazenamento foi dimensionada de modo a que a temperatura média no interior da habitação tome valores próximos dos 20 °C (temperatura mínima de referência utilizada pelo método de cálculo do RCCTE para a estação de aquecimento). Com efeito, nas simulações efectuadas, a temperatura interior média da habitação durante a estação de aquecimento obteve valores entre os 20 °C e os 20,3 °C. As dimensões adoptadas para a parede de armazenamento são 2 metros de largura por 3 metros de altura (pé direito), ocupando 20% da fachada Sul da habitação.

De modo a modelar a parede de armazenamento no EnergyPlus foi definido um objecto na zona 1 (zona aquecida) em “BuildingSurface:Detailed”, que irá substituir uma parcela da fachada Sul da habitação. De seguida criou-se na zona 2 (espaço de ar entre a parede e o envidraçado) um objecto que funcionará como zona de Trombe acoplada à zona de habitação, com a solução construtiva simétrica à da zona 1. Foi também definida a “caixa de Trombe”, isto é, a caixilharia que suporta o envidraçado acoplado à parede de armazenamento. A solução construtiva da caixilharia foi definida como madeira de 10cm de espessura. A profundidade da Zona 2 definirá a espessura da camada de ar da parede de armazenamento. No campo “FenestrationSurface:Detailed” foi criado um objecto referente ao envidraçado, associado à parede de armazenamento da zona 2, formando um rebordo de 10cm à volta do vão envidraçado. No quadro 4.7 estão indicadas as características adoptadas para o elemento opaco. O valor do coeficiente de absorção solar (α) resulta da utilização de pintura preta na superfície exterior do elemento opaco [29].

Quadro 4. 7 - Dados do elemento opaco.

Largura - L (m)	2
Altura - H (m)	3
Área total - A (m^2)	6
Coeficiente de absorção solar - α (incidência normal)	0,8

No quadro 4.8 encontram-se as características do vão envidraçado utilizado para isolar o elemento opaco. A sua espessura (e , em m^2) e condutibilidade térmica (λ , em $W/m \cdot ^\circ C$) foram fornecidos através de simulações no software EnergyPlus.

Quadro 4. 8 - Características do vão envidraçado da parede de armazenamento.

Tipo	Vidro simples
Largura - L (m)	1,8
Altura - H (m)	2,8
Área de envidraçado - A_e (m ²)	5,04
Espessura - e (m)	0,003
Condutibilidade - λ (W/m. °C)	0,9
Resistência térmica do vidro - R_g (W/m ² . °C)	0,003

O factor de obstrução (F_s), o factor de caixilharia (F_g) e o factor solar de incidência normal (g_{\perp}) estão indicados no quadro 4.9. F_g foi calculado através do quociente entre a área envidraçada e a área total da parede de armazenamento. O factor solar (g_{\perp}) foi determinado através de simulações no EnergyPlus e F_s foi calculado de acordo com a seguinte expressão [29]:

$$F_s = F_h \cdot F_0 \cdot F_f \quad (4.1)$$

Em que $F_0 \cdot F_f$ toma o valor de 0,9 de modo a contabilizar o efeito de sombreamento do contorno do vão e F_h toma o valor de 1, dado que a fachada Sul da habitação em estudo não é sombreada [29].

Quadro 4. 9 - Factores solares do envidraçado da parede de armazenamento.

Factor de obstrução - F_s	0,9
Factor de caixilharia - F_g	0,840
Factor solar (incidência normal) - g_{\perp}	0,905

4.4.2. Condições iniciais da parede de armazenamento

Numa primeira fase definiu-se a parede de armazenamento com o elemento opaco com 20cm de espessura, com uma camada de ar de 10cm de espessura. O material de armazenamento térmico utilizado é o betão. Esta é a solução construtiva de base que servirá para fazer uma análise de sensibilidade do comportamento energético da parede de armazenamento na habitação (comparando os resultados obtidos pelas duas metodologias), recorrendo-se às variáveis adoptadas para o estudo.

4.4.3. Variáveis adoptadas para o estudo

Foram estudados três conjuntos de variáveis distintas. A primeira é a espessura do elemento opaco (espessura do material de armazenamento térmico). Esta variável toma valores de 20cm, 25cm e 30cm de espessura. De seguida, fixando em 20cm a espessura do elemento opaco, analisou-se a

espessura da camada de ar para valores de 5cm, 10cm e 15cm. Posteriormente, e fixando em 20cm a espessura do elemento opaco e em 10cm a espessura da camada de ar, foram analisados dois materiais de armazenamento térmico para o elemento opaco (betão e pedra). As três variáveis foram analisadas para as zonas de Lisboa, Porto e Bragança. Para cada conjunto de variáveis são determinados os ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento e as necessidades nominais de aquecimento da habitação. Os resultados desta análise, obtidos pelo método simplificado aplicado ao RCCTE e pelo método do EnergyPlus, são apresentados no capítulo 5.

5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA HABITAÇÃO

Apresentada a metodologia e o caso de estudo, segue-se a apresentação e análise de resultados. Neste capítulo são apresentados, primeiramente, os resultados das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo RCCTE e pelo EnergyPlus para a habitação sem parede de armazenamento térmico. O objectivo é poder comparar as necessidades nominais de aquecimento da habitação antes e depois da introdução da parede de armazenamento térmico de modo a analisar o desempenho energético do sistema passivo para ambas as metodologias.

De seguida são analisados os valores obtidos para as resistências térmicas da camada de ar para as diversas variáveis e localizações estudadas. São também apresentados os resultados das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo método simplificado aplicado ao RCCTE (“RCCTE modificado”) e pelo método do EnergyPlus, com a introdução da parede de armazenamento na habitação. É também feita uma análise aos ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento obtidos pelo método simplificado e pelo método do EnergyPlus.

5.1. Análise da habitação sem parede de armazenamento

5.1.1. Resultados obtidos pelo RCCTE

No quadro 5.1 estão indicados os valores obtidos para as perdas térmicas pela envolvente exterior e pelos vãos envidraçados, os ganhos solares pelos vãos envidraçados e os ganhos internos para as estações de aquecimento de Lisboa, Porto e Bragança. Estão também representadas as necessidades nominais de aquecimento para as três localizações.

Quadro 5. 1 - Ganhos solares e internos, perdas térmicas e necessidades nominais de aquecimento para a situação inicial, para Lisboa, Porto e Bragança - RCCTE.

	Lisboa	Porto	Bragança
Perdas pela envolvente exterior ($kW \cdot h/ano$)	3219,68	5163,47	7161,50
Perdas pelos vãos envidraçados ($kW \cdot h/ano$)	739,07	1185,26	1643,90
Perdas por renovação de ar ($kW \cdot h/ano$)	1656,81	2657,06	3685,22
Ganhos pelos vãos envidraçados ($kW \cdot h/ano$)	450,87	707,26	678,55
Ganhos internos ($kW \cdot h/ano$)	1267,20	2102,40	1987,20
Necessidades de aquecimento - N_{ic} ($kW \cdot h/m^2 \cdot ano$)	39,06	62,11	98,28

5.1.2. Resultados obtidos pelo EnergyPlus

O quadro 5.2 apresenta os resultados obtidos para as perdas térmicas pela envolvente exterior, ganhos e perdas pelos vãos envidraçados, perdas por renovação de ar e ganhos internos para Lisboa, Porto e Bragança. Estes valores correspondem aos valores médios para as respectivas estações de aquecimento.

Quadro 5. 2 - Ganhos solares e internos, perdas térmicas e necessidades nominais de aquecimento para a situação inicial, para Lisboa, Porto e Bragança - EnergyPlus.

	Lisboa	Porto	Bragança
Perdas pela envolvente exterior ($kW \cdot h/ano$)	2390,61	3599,29	5053,19
Perdas pelos vãos envidraçados ($kW \cdot h/ano$)	477,31	776,85	940,55
Perdas por renovação de ar ($kW \cdot h/ano$)	1681,13	2776,10	3579,34
Ganhos pelos vãos envidraçados ($kW \cdot h/ano$)	333,82	745,87	657,97
Ganhos internos ($kW \cdot h/ano$)	638,40	1060,80	1012,80
Necessidades de aquecimento - N_{ic} ($kW \cdot h/m^2 \cdot ano$)	29,73	41,92	68,54

5.1.3. Comparação de resultados

A figura 5.1 apresenta as necessidades nominais de aquecimento para Lisboa, Porto e Bragança, para as duas metodologias em estudo. Estão também representadas as percentagens em que os resultados alcançados pelo EnergyPlus são inferiores aos obtidos pelo RCCTE.

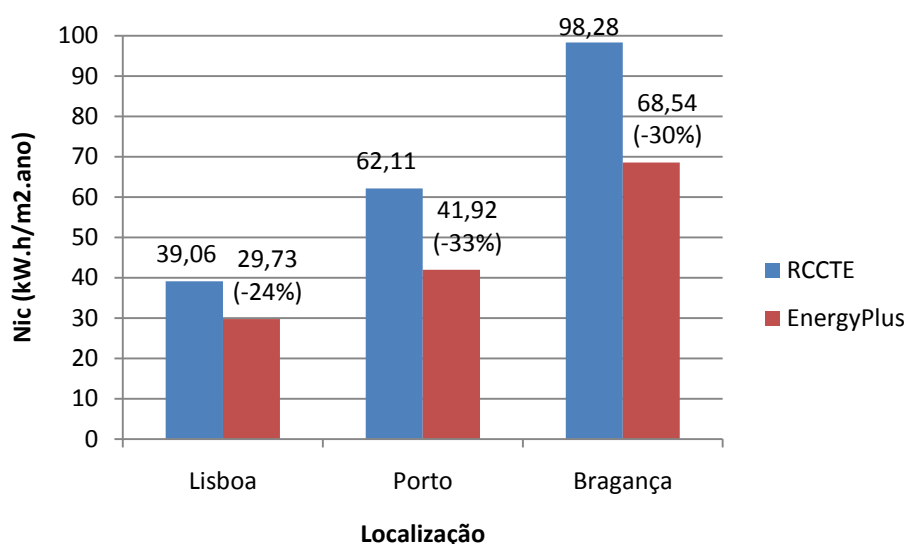


Fig. 5. 1 – Necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo RCCTE e pelo EnergyPlus para a habitação sem parede de armazenamento térmico – Lisboa, Porto e Bragança.

Os resultados obtidos indicam que as necessidades nominais de aquecimento pela metodologia do RCCTE são cerca de 24% superiores às obtidas pela ferramenta de simulação EnergyPlus para o caso de Lisboa, 33% para o caso do Porto e 30% para Bragança. Apesar de as condições serem idênticas para ambos os métodos, a diferença observada é explicada pelo facto de se tratar de dois métodos distintos. O método do RCCTE baseia-se em balanços energéticos mensais ou sazonais, determinados em regime estacionário através de valores médios. Por outro lado, o método contemplado pelo EnergyPlus recorre a simulações dinâmicas detalhadas (variáveis no tempo) em que a interacção entre ganhos e perdas é tida em conta. Contudo, é esta diferença percentual a ter em conta quando for introduzida uma parede de armazenamento na habitação em estudo de modo a observar se a diferença entre os métodos se mantém constante, no sentido de validar a metodologia de cálculo da contribuição energética da parede de armazenamento baseada na norma ISO 13790 aplicada ao RCCTE.

5.2. Análise da habitação com parede de armazenamento

Nesta secção é analisado o comportamento térmico da habitação com uma parede de armazenamento. Numa primeira fase analisam-se os resultados obtidos para a resistência térmica da camada de ar da parede de armazenamento, de acordo com as soluções construtivas adoptadas para a parede de armazenamento, para as diferentes localizações geográficas em estudo. Posteriormente são analisados os ganhos solares e as perdas térmicas pela parede de armazenamento e as necessidades nominais de aquecimento obtidas pelos dois métodos em estudo. Esta análise, feita para as três localidades em estudo, divide-se em três pontos: variação da espessura do elemento opaco, variação da espessura da camada de ar e variação do material de armazenamento térmico. Os valores dos coeficientes de transmissão térmica, áreas colectoras efectivas e coeficientes de perda de calor da parede de armazenamento utilizados para a determinação dos ganhos solares e perdas térmicas através do método simplificado podem ser consultados no anexo 4.

5.2.1. Resultados da resistência térmica da camada de ar

Tal como foi descrito no capítulo 3, de modo a determinar a resistência térmica da camada de ar é necessário calcular os coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção (h_c) e por radiação (h_r). O coeficiente de transmissão térmica superficial por radiação é calculado com base nos valores médios sazonais de temperatura das duas superfícies em contacto com a camada de ar (através da expressão 3.9), apresentados no quadro 5.3.

Quadro 5. 3 – Temperaturas médias sazonais das superfícies em contacto com a camada de ar obtidas pelo EnergyPlus.

		Lisboa		Porto		Bragança	
		T_p	T_v	T_p	T_v	T_p	T_v
Espessura do elemento opaco	20cm	28,69	26,16	27,59	25,22	25,56	22,76
	25cm	29,12	26,45	27,95	25,46	25,85	22,96
	30cm	29,51	26,73	28,26	25,68	26,11	23,14
Espessura da camada de ar	5cm	28,86	26,39	27,76	25,42	25,75	22,99
	10cm	28,69	26,16	27,59	25,22	25,56	22,76
	15cm	28,53	25,97	27,42	25,04	25,38	22,57
Material do elemento opaco	Betão	28,69	26,16	27,59	25,22	25,56	22,76
	Pedra	28,46	25,99	27,40	25,08	25,41	22,65

Os valores médios sazonais dos coeficientes de transmissão térmica por radiação para as três zonas climáticas em estudo são apresentados no quadro 5.4. Os resultados obtidos revelam não existir diferenças significativas nos valores do coeficiente de transmissão térmica por radiação para as três variáveis em estudo. Em média, a zona de Lisboa obteve os resultados mais elevados, seguida da zona do Porto e, por fim, da zona de Bragança.

Quadro 5. 4 – Coeficientes de transmissão térmica por radiação – Lisboa, Porto e Bragança.

		Lisboa	Porto	Bragança
Espessura do elemento opaco	20cm	5,040	4,988	4,877
	25cm	5,058	5,003	4,889
	30cm	5,075	5,017	4,900
Espessura da camada de ar	5cm	5,049	4,998	4,887
	10cm	5,040	4,988	4,877
	15cm	5,031	4,980	4,868
Material do elemento opaco	Betão	5,040	4,988	4,877
	Pedra	5,029	4,980	4,871

Os valores médios sazonais para os coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção obtidos através de simulações no EnergyPlus são apresentados no quadro 5.5. Os valores obtidos para este coeficiente revelam diferenças pouco expressivas nas variáveis estudadas. Observa-se, contudo, um ligeiro aumento com o aumento da espessura do elemento opaco, e com o aumento da espessura da camada de ar. Em média, a zona de Bragança obteve os resultados mais elevados, seguida da zona de Lisboa e, por fim, da zona do Porto.

Quadro 5. 5 – Coeficiente de transmissão térmica por convecção – Lisboa, Porto e Bragança.

		Lisboa	Porto	Bragança
Espessura do elemento opaco	20cm	2,025	2,011	2,122
	25cm	2,073	2,052	2,153
	30cm	2,108	2,080	2,174
Espessura da camada de ar	5cm	1,971	1,946	2,057
	10cm	2,025	2,011	2,122
	15cm	2,034	2,016	2,129
Material do elemento opaco	Betão	2,025	2,011	2,122
	Pedra	2,011	1,998	2,113

As resistências térmicas da camada de ar para são calculadas recorrendo aos valores dos coeficientes de transmissão térmica superficial por convecção e radiação (através da expressão 3.3). Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, para as três variáveis estudadas.

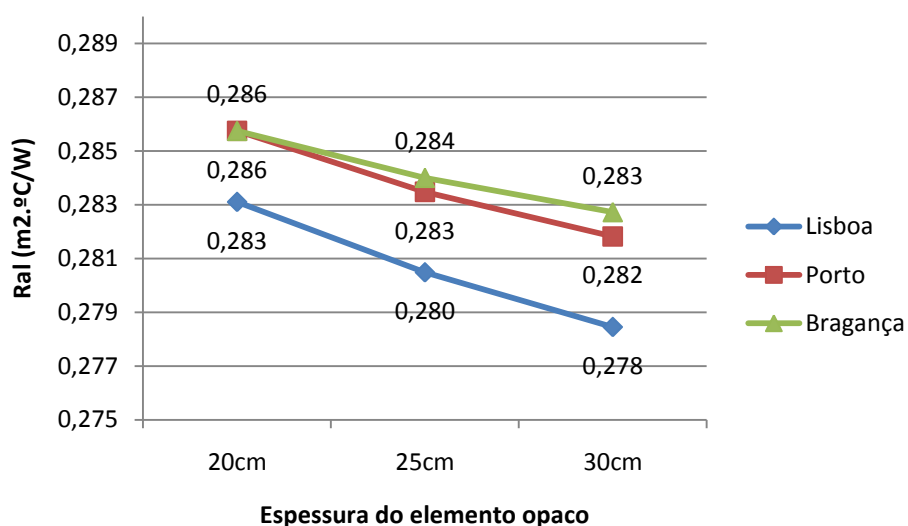


Fig. 5. 2 – Resistências térmicas da camada de ar para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.

Analisando a figura 5.2 observa-se uma ligeira diminuição da resistência térmica da camada de ar com o aumento da espessura do elemento opaco, sendo que os valores obtidos para a zona do Porto são bastante semelhantes aos obtidos para a zona de Bragança, embora ligeiramente menores para as espessuras de 10cm e 15cm. Os valores mais baixos de resistência térmica da camada de ar foram obtidos para a zona de Lisboa.

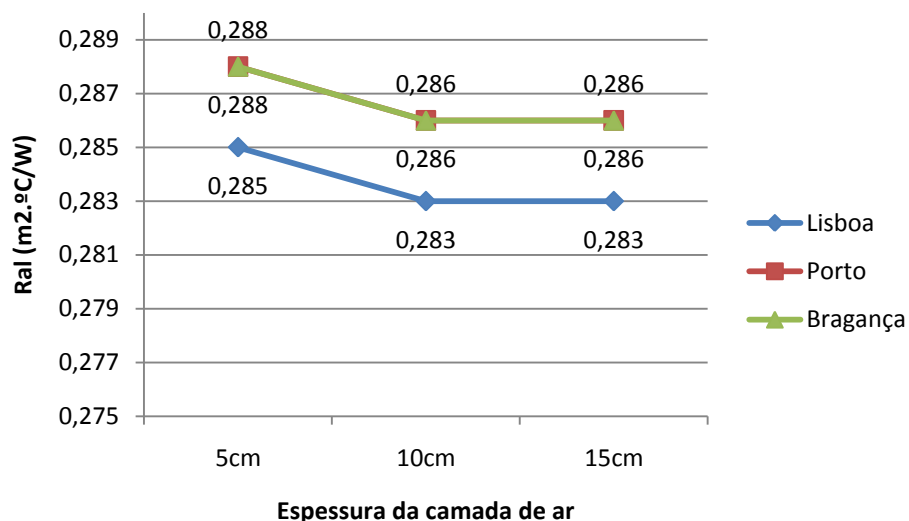


Fig. 5. 3 – Resistência térmica da camada de ar para as três espessuras da camada de ar – Lisboa, Porto e Bragança.

Observando o andamento do gráfico da figura 5.3, verifica-se que as resistências térmicas da camada de ar mantêm o mesmo valor para as espessuras da camada de ar de 10cm e 15cm, sendo que os valores obtidos para a espessura de 5cm são ligeiramente superiores nas três zonas em estudo. É de referir ainda que os valores obtidos para o Porto são idênticos aos obtidos para Bragança. Lisboa obteve os valores de resistência térmica mais baixos entre as três cidades, à semelhança do que se observou quando se fez variar a espessura do elemento opaco (figura 5.2).

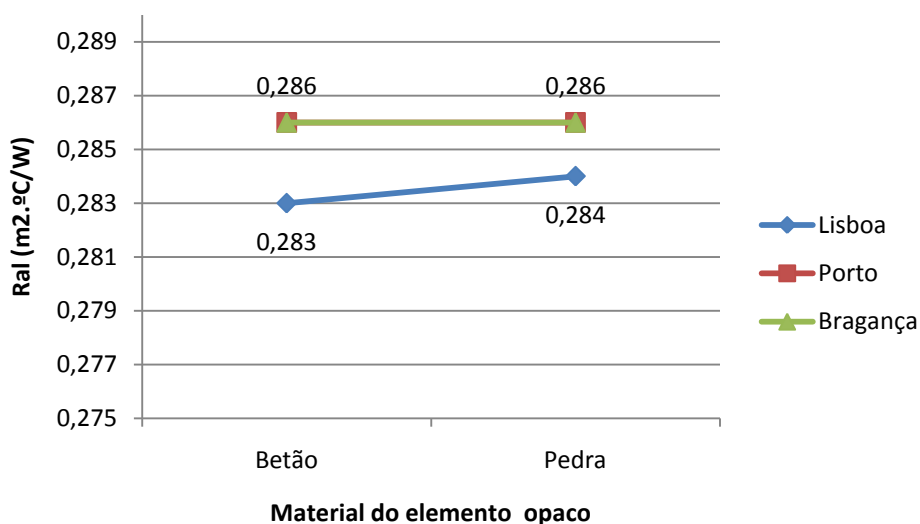


Fig. 5. 4 – Resistência térmica da camada de ar para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.

Quanto ao material de armazenamento térmico (figura 5.4), observa-se para Lisboa um ligeiro aumento na resistência térmica da camada de ar no uso de pedra em vez de betão. As outras duas zonas em estudo obtiveram resultados idênticos para os dois materiais. Lisboa obteve, mais uma vez, os valores de resistência térmica da camada de ar mais baixos entre as três zonas em estudo.

Parte-se do pressuposto de que os valores obtidos para as resistências térmicas da camada de ar da parede de armazenamento são fiáveis, na medida em que foram determinados recorrendo a valores obtidos através de simulações no EnergyPlus e a um modelo do comportamento térmico validado experimentalmente [33]. Como tal, estes valores (quadro 5.6) são utilizados no método de cálculo simplificado, cujos resultados são apresentados de seguida para as três variáveis em estudo.

Quadro 5. 6 – Resistências térmicas da camada de ar da parede de armazenamento para as três variáveis em estudo – Lisboa, Porto e Bragança.

		Lisboa	Porto	Bragança
Espessura do elemento opaco	20cm	0,283	0,286	0,286
	25cm	0,280	0,283	0,284
	30cm	0,278	0,282	0,283
Espessura da camada de ar	5cm	0,285	0,288	0,288
	10cm	0,283	0,286	0,286
	15cm	0,283	0,286	0,286
Material do elemento opaco	Betão	0,283	0,286	0,286
	Pedra	0,284	0,286	0,286

5.2.2. Análise da espessura do elemento opaco

A primeira variável a ser analisada é a espessura do elemento opaco. O material de armazenamento térmico é constituído por betão e a espessura da camada de ar é de 10cm. São analisadas três espessuras para o elemento opaco: 20cm, 25cm e 30cm. O objectivo é comparar os resultados obtidos pelo método simplificado com os resultados obtidos pelo EnergyPlus.

5.2.2.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento

A título de exemplo, apresentam-se nos quadros 5.7, 5.8 e 5.9 os resultados dos ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais obtidos pelo método simplificado e pelo EnergyPlus, para a zona climática de Lisboa, Porto e Bragança, respectivamente. Para as restantes duas variáveis em estudo (espessura da camada de ar e material de armazenamento térmico), os valores obtidos podem ser consultados no anexo 4. Os ganhos totais resultam da diferença entre os ganhos térmicos solares

brutos (expressão 2.12) e as perdas térmicas através da parede de armazenamento (expressão 3.12, aplicada apenas à parede de armazenamento).

Quadro 5. 7 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa.

Espessura do elemento opaco	Ganhos solares ($kW.h$)		Perdas térmicas ($kW.h$)		Ganhos totais ($kW.h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	841,41	659,11	245,25	5,59	596,16	653,52
25 cm	801,96	627,77	235,92	2,86	566,04	624,91
30 cm	766,52	599,70	226,90	1,39	539,62	598,31

Quadro 5. 8 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Porto.

Espessura do elemento opaco	Ganhos solares ($kW.h$)		Perdas térmicas ($kW.h$)		Ganhos Totais ($kW.h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	1324,89	912,45	391,21	16,23	933,68	896,22
25 cm	1263,14	865,75	376,40	10,29	886,73	855,46
30 cm	1211,06	825,56	360,89	6,56	850,17	819,0

Quadro 5. 9 - Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais pela parede de armazenamento para as três espessuras do elemento opaco – Bragança.

Espessura do elemento opaco	Ganhos solares ($kW.h$)		Perdas térmicas ($kW.h$)		Ganhos Totais ($kW.h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	1271,11	739,56	542,59	51,12	728,52	688,45
25 cm	1213,49	693,08	521,16	37,28	692,33	655,81
30 cm	1161,89	654,65	500,53	27,88	661,36	626,77

Verifica-se que os ganhos brutos obtidos pelo método simplificado são maiores que os obtidos pelo EnergyPlus. No entanto, as perdas térmicas determinadas pelo EnergyPlus são bastante menores que as determinadas pelo método simplificado, resultando em ganhos térmicos totais bastante próximos. Uma análise idêntica pode ser feita para as outras duas variáveis em estudo (espessura da camada de ar e material de armazenamento térmico).

Analisando o andamento dos ganhos totais em função da espessura do elemento opaco, para a zona climática de Lisboa (figura 5.5), pode constatar-se que os resultados obtidos pelo método simplificado seguem a tendência dos resultados apresentados pelas simulações feitas através do EnergyPlus.

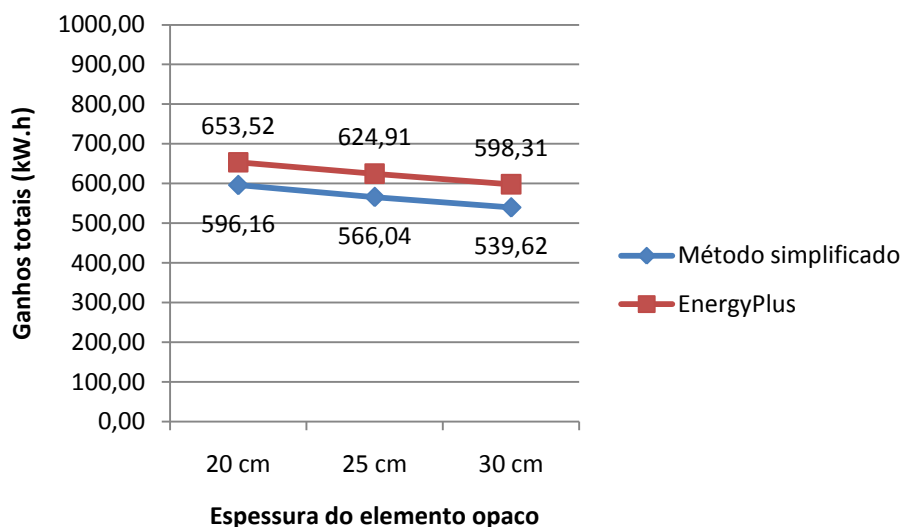


Fig. 5. 5 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa.

Com efeito, em ambas as metodologias, os valores obtidos para os ganhos totais vão decrescendo de forma praticamente constante com o aumento da espessura do elemento opaco. Além disso pode verificar-se também que, para cada espessura, os valores obtidos por ambas as metodologias são bastante próximos, sendo que os resultados obtidos pelo método simplificado são inferiores em cerca de 9% (9% para a espessura de 20cm e 25cm e 10% para a de 30cm).

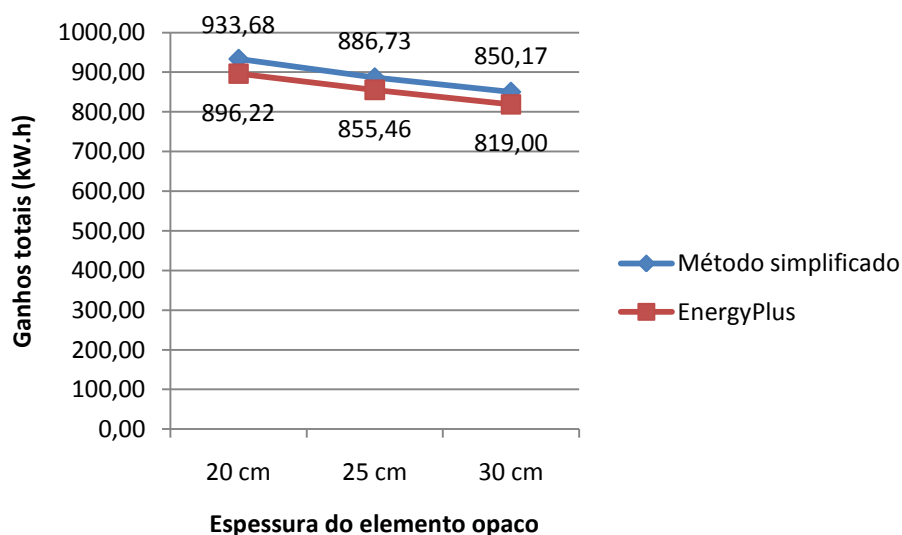


Fig. 5. 6 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Porto.

Quanto à zona climática do Porto, também os resultados obtidos pelo método simplificado seguem a tendência dos resultados apresentados pelo EnergyPlus, como se constata na figura 5.6.

Mas, ao contrário do que acontece para Lisboa, os valores obtidos pelo método simplificado são ligeiramente superiores aos obtidos pelo EnergyPlus (4% para as três espessuras). No entanto, observa-se uma menor divergência de valores no que respeita à diferença entre os dois métodos, em comparação com o que acontece em Lisboa.

Para a zona climática de Bragança (figura 5.7), a análise é semelhante à da zona climática do Porto, ou seja, a diferença entre as duas metodologias mantém-se praticamente constante, sendo que a divergência observada entre os dois métodos é ligeiramente superior (6% para a espessura de 20cm e 5% para as espessuras de 25cm e 30cm).

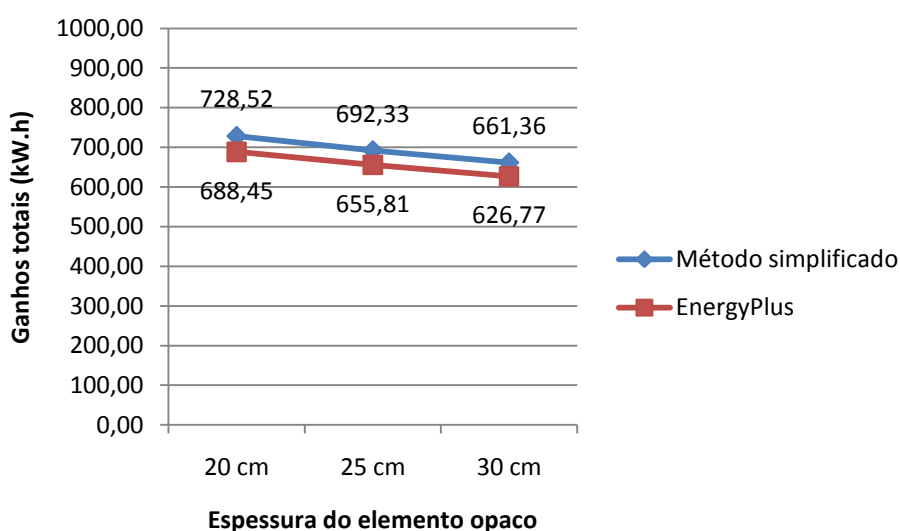


Fig. 5. 7 – Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras do elemento opaco – Bragança.

5.2.2.2. Necessidades nominais de aquecimento

Os três gráficos seguintes traduzem, para as zonas de Lisboa, Porto e Bragança, as necessidades nominais de aquecimento para a habitação com uma parede de armazenamento (em função da espessura do elemento opaco) pela metodologia do EnergyPlus e pelo método “RCCTE modificado”. O método “RCCTE modificado” consiste na inclusão do método simplificado adoptado para o cálculo dos ganhos solares e perdas térmicas através de paredes de armazenamento na metodologia de cálculo do RCCTE, de acordo com o que se apresenta nos capítulos 3 e 4.

Analisando o gráfico 5.8 (referente às necessidades nominais de aquecimento para Lisboa) observa-se que a diferença entre metodologias mantém-se praticamente constante à medida que se aumenta a espessura do elemento opaco. O método “RCCTE modificado” origina valores superiores aos do EnergyPlus em, aproximadamente, $10 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para cada uma das três espessuras

estudadas. Para a situação inicial (sem parede de armazenamento), a diferença entre metodologias (RCCTE e EnergyPlus) situa-se nos $9 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$. A inclusão do método simplificado no RCCTE não originou, portanto, discrepâncias significativas na diferença entre métodos (estático e dinâmico) nas necessidades nominais de aquecimento (apenas $1 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$).

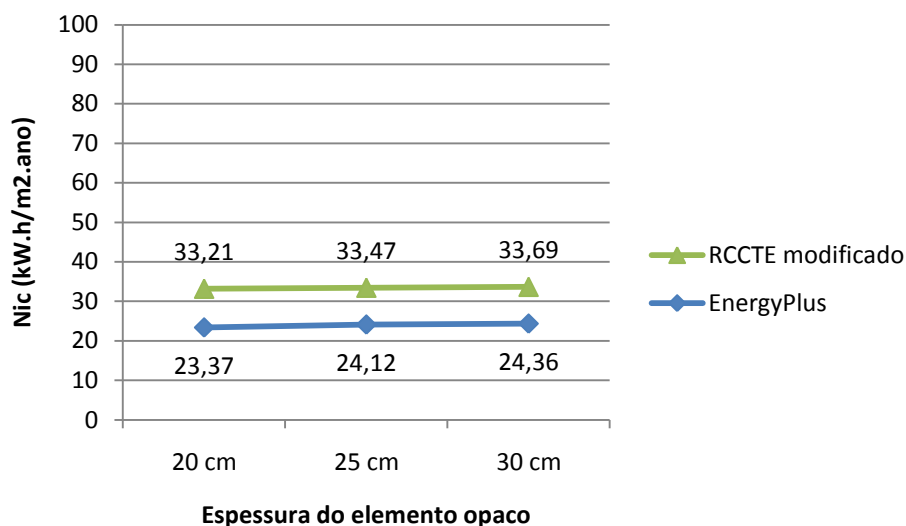


Fig. 5. 8 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Lisboa.

Uma análise semelhante pode ser feita para as outras duas localizações estudadas. No caso do Porto (figura 5.9), a diferença entre metodologias é de $18 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para as três espessuras em estudo ($20 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para a situação inicial).

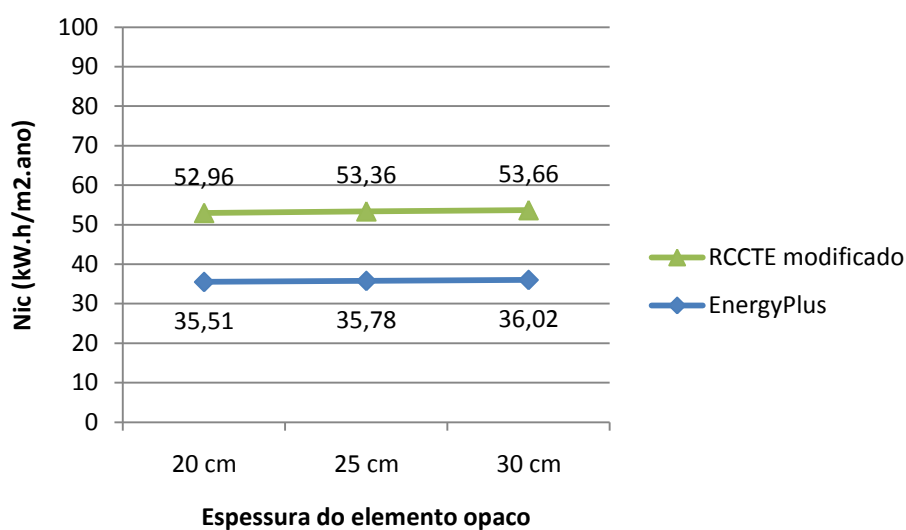


Fig. 5. 9 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Porto.

Para a zona de Bragança (figura 5.10) os valores obtidos pelo “RCCTE modificado” são inferiores aos obtidos pelo EnergyPlus em $29 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ ($30 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para a situação inicial). Com efeito, o método “RCCTE modificado” obteve resultados concordantes com os valores obtidos pelo EnergyPlus, isto é, ambos aumentam de forma praticamente constante à medida que se aumenta a espessura do elemento opaco.

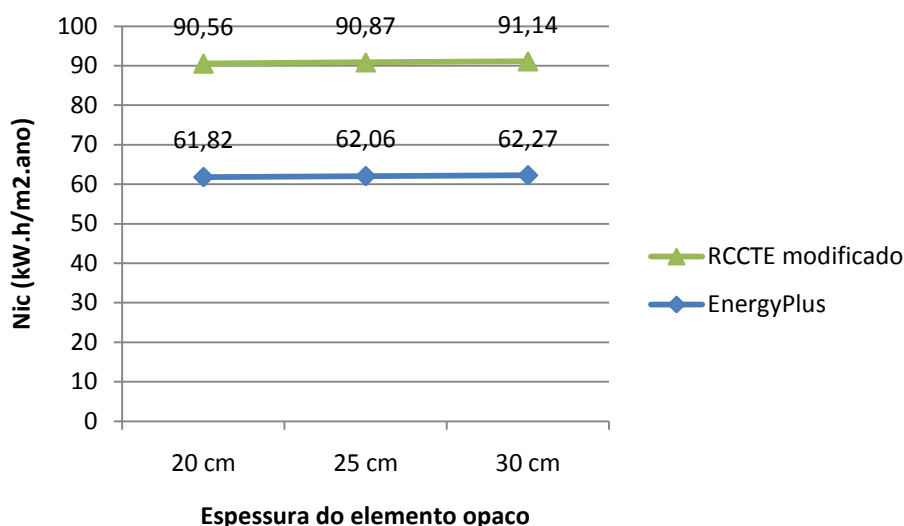


Fig. 5. 10 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento, para as três espessuras de elemento opaco – Bragança.

Os três gráficos abaixo apresentados traduzem a percentagem de redução das necessidades nominais de aquecimento resultantes da introdução da parede de armazenamento, em função da espessura do elemento opaco. São comparados os resultados obtidos por ambos métodos, para as três localidades em estudo (figura 5.11 para Lisboa, figura 5.12 para o Porto e figura 5.13 para Bragança). A percentagem de redução das necessidades nominais de aquecimento é determinada pelo quociente entre a diferença do índice N_{ic} da habitação sem parede de armazenamento e com parede de armazenamento, e o índice N_{ic} para a situação inicial, isto é, sem parede de armazenamento (figura 5.1).

De uma forma geral, observa-se um decréscimo na redução das necessidades nominais de aquecimento à medida que se aumenta a espessura do elemento opaco. Apesar de este decréscimo ser pouco expressivo em termos práticos, serve para mostrar que os resultados obtidos pelo método simplificado aplicado ao RCCTE seguem a tendência dos resultados apresentados pelas simulações efectuadas através do EnergyPlus. As reduções do índice N_{ic} (percentagem de energia “poupada” com a introdução da parede de armazenamento) obtidas pelos dois métodos diminuem com o incremento da espessura do elemento opaco para as três zonas climáticas em estudo.

Para a zona de Lisboa (figura 5.11), as reduções das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo método “RCCTE modificado” são inferiores às obtidas pelo método do EnergyPlus em cerca de 5% (6,4% para a espessura de 20cm, 4,6% para a de 25cm e 4,4% para a de 30cm).

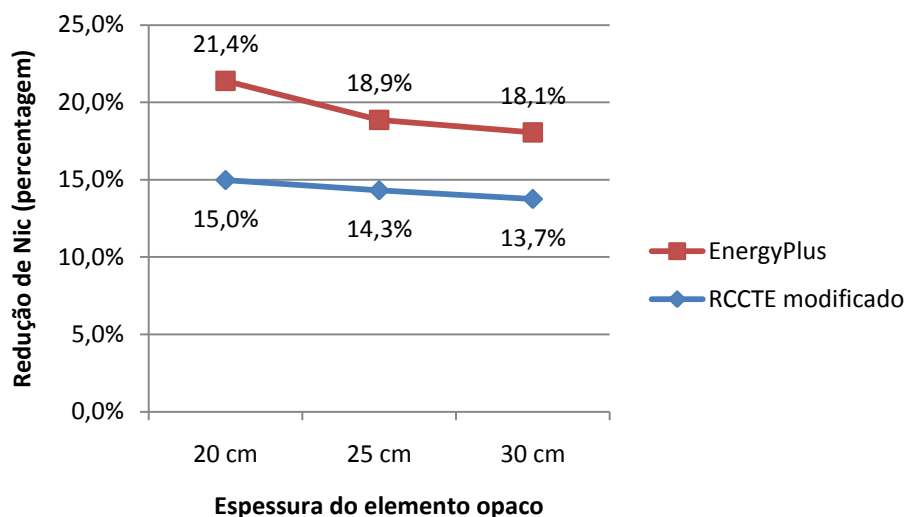


Fig. 5. 11 – Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Lisboa.

Já caso do Porto (figura 5.12) a diferença entre os dois métodos na percentagem de redução é praticamente nula (cerca de meio ponto percentual para cada espessura). No caso de Bragança (figura 5.13), à semelhança do que acontece para Lisboa e Porto, as percentagens de redução obtidas pelo método “RCCTE modificado” são ligeiramente inferiores às obtidas pelo método do EnergyPlus. Contudo, essa diferença é menor que no caso de Lisboa (cerca de 2% para cada espessura).

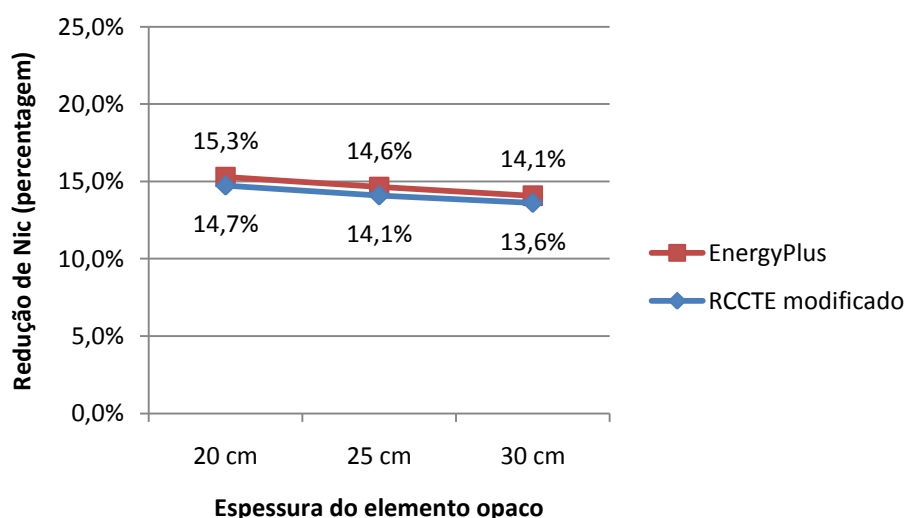


Fig. 5. 12 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Porto.

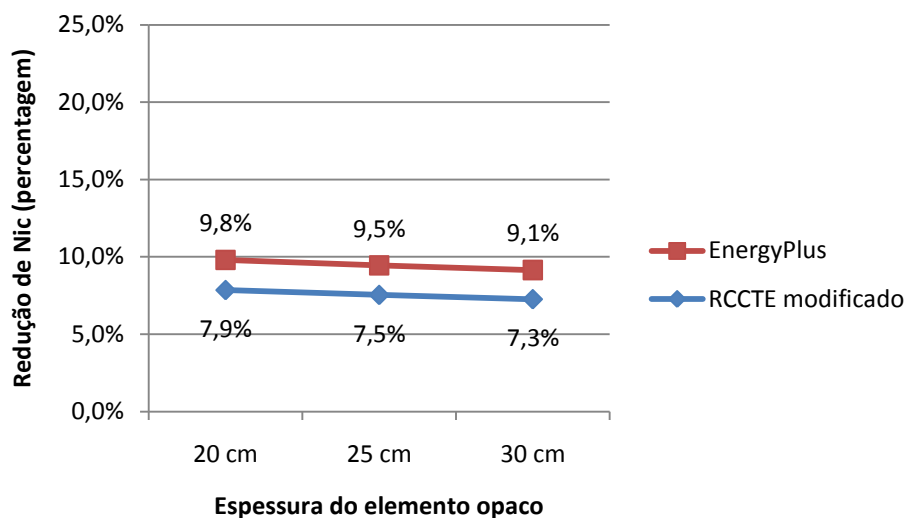


Fig. 5. 13 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de elemento opaco – Bragança.

O quadro 5.10 traduz a diferença percentual entre as necessidades nominais de aquecimento obtidas pelas duas metodologias estudadas para as zonas climáticas de Lisboa, Porto e Bragança. Para a situação inicial é representada a percentagem em que os resultados obtidos pelo RCCTE são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Para as espessuras do elemento opaco de 20cm, 25cm, 30cm é representada a percentagem em que os resultados obtidos pelo “RCCTE modificado” são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. A diferença percentual é obtida através do quociente entre a diferença do índice N_{ic} entre os dois métodos e o seu valor total obtido pelo RCCTE.

Para o caso de Lisboa, o valor das necessidades de aquecimento obtidas pelo RCCTE são 24% superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Com a introdução do método simplificado no RCCTE, essa diferença subiu, em média, para cerca de 28% (a divergência aumentou 4%).

Para o caso do Porto, tanto para a situação inicial como para as situações da introdução do método simplificado no RCCTE, a diferença entre metodologias manteve-se praticamente igual (33%).

No caso de Bragança, a diferença percentual entre metodologias é de 30% para a situação inicial e de 32% para os restantes casos (a divergência aumentou 2%).

Estes resultados parecem apontar para uma melhor adaptação do método simplificado para a zona climática do Porto, uma vez que não se observaram divergências entre os métodos estático e dinâmico, com a introdução do método simplificado no RCCTE. Contudo, para as zonas de Bragança e Lisboa, as divergências observadas não põem em causa a validade do método simplificado, dado que são bastante pequenas.

Quadro 5. 10 – Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para as três espessuras do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.

		N_{ic} (kW.h/m ² .ano)		Diferença percentual de N_{ic}
Lisboa	Inicial	RCCTE	39,06	24%
		EnergyPlus	29,73	
	20 cm	RCCTE modificado	33,21	30%
		EnergyPlus	23,37	
	25 cm	RCCTE modificado	33,47	28%
		EnergyPlus	24,12	
	30 cm	RCCTE modificado	33,69	28%
		EnergyPlus	24,36	
Porto	Inicial	RCCTE	62,11	33%
		EnergyPlus	41,92	
	20 cm	RCCTE modificado	52,96	33%
		EnergyPlus	35,51	
	25 cm	RCCTE modificado	53,36	33%
		EnergyPlus	35,78	
	30 cm	RCCTE modificado	53,66	33%
		EnergyPlus	36,02	
Bragança	Inicial	RCCTE	98,28	30%
		EnergyPlus	68,54	
	20 cm	RCCTE modificado	90,56	32%
		EnergyPlus	61,82	
	25 cm	RCCTE modificado	90,87	32%
		EnergyPlus	62,06	
	30 cm	RCCTE modificado	91,14	32%
		EnergyPlus	62,27	

5.2.3. Análise da espessura da camada de ar

A segunda variável em estudo é a espessura da camada de ar da parede de armazenamento térmico. Nesta análise adoptaram-se os valores de 5cm, 10cm e 15cm para a espessura da camada de ar. Os resultados foram obtidos para a parede de armazenamento com o elemento opaco constituído por betão com 20cm de espessura. Os valores obtidos para os coeficientes de transmissão térmica, área colectora efectiva e coeficiente de perda de calor da parede de armazenamento térmico (para Lisboa, Porto e Bragança) podem ser consultados no anexo 4.

5.2.3.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento

Os gráficos das figuras 5.14, 5.15 e 5.16 traduzem os resultados dos ganhos térmicos totais em função da espessura da camada de ar, obtidos pelo método simplificado e pelo método do EnergyPlus, para as zonas de Lisboa, Porto e Bragança, respectivamente. Os ganhos totais resultam da diferença entre os ganhos térmicos solares e as perdas térmicas através da parede de armazenamento.

Analisando os ganhos totais quando se faz variar a espessura da camada de ar, observa-se que os resultados obtidos pelo EnergyPlus decrescem com o incremento da referida espessura. No entanto, os resultados obtidos pelo método simplificado apenas seguem a tendência observada para os resultados do EnergyPlus para as duas primeiras espessuras. Os resultados obtidos para a camada de ar de 10cm são idênticos aos obtidos para a camada de ar de 15cm para as três zonas climáticas em estudo. Isto acontece porque a resistência térmica da camada de ar calculada para a espessura de 10cm originou resultados idênticos para a resistência da camada de ar para a espessura de 15cm (figura 5.3). Um vez que a resistência da camada de ar é o único valor que se fez variar, os resultados obtidos para os ganhos totais são também idênticos. Em termos práticos, contudo, os resultados sugerem não haver diferenças significativas para as três espessuras em estudo.

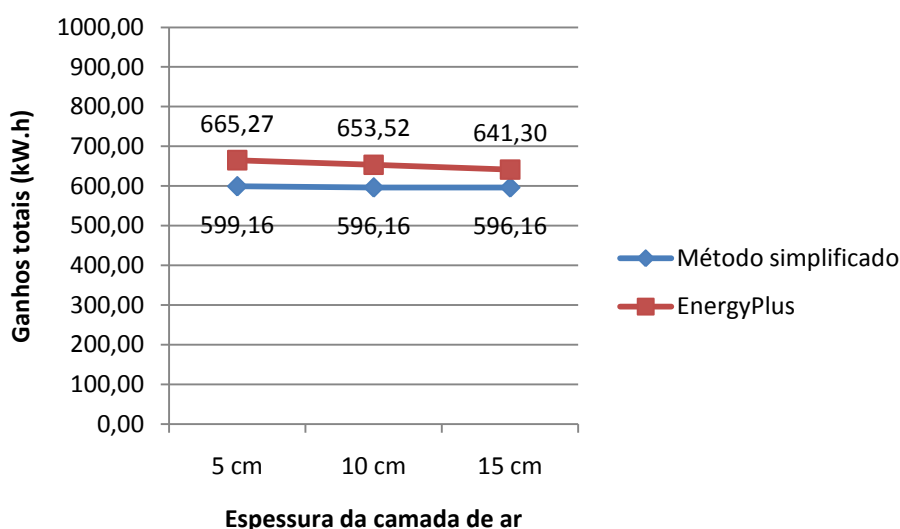


Fig. 5. 14 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Lisboa.

Para Lisboa, à semelhança do que se observou quando se fez variar a espessura do elemento opaco, os resultados obtidos pelo EnergyPlus são ligeiramente superiores aos obtidos pelo método simplificado, sendo que diferem, em média, cerca de 9% (figura 5.14). A divergência tende a diminuir à medida que aumenta a espessura da camada de ar (10% para a espessura de 5cm, 9% para a de 10cm e 7% para a de 15cm). Apesar de os resultados obtidos pelo método simplificado se manterem

praticamente constantes para as três espessuras, observa-se uma convergência com os resultados alcançados pelo EnergyPlus à medida que se aumenta a referida espessura.

No caso do Porto, tal como aconteceu quando se fez variar a espessura do elemento opaco, os ganhos totais obtidos pelo método simplificado são ligeiramente superiores aos obtidos pelo EnergyPlus, ao contrário do que acontece para Lisboa. Analisando a figura 5.15, observa-se que a diferença entre os dois métodos é cerca de 4%, com tendência para divergir com o aumento da espessura da camada de ar (2% para a espessura de 5cm, 4% para a de 10cm e 6% para a de 15cm).

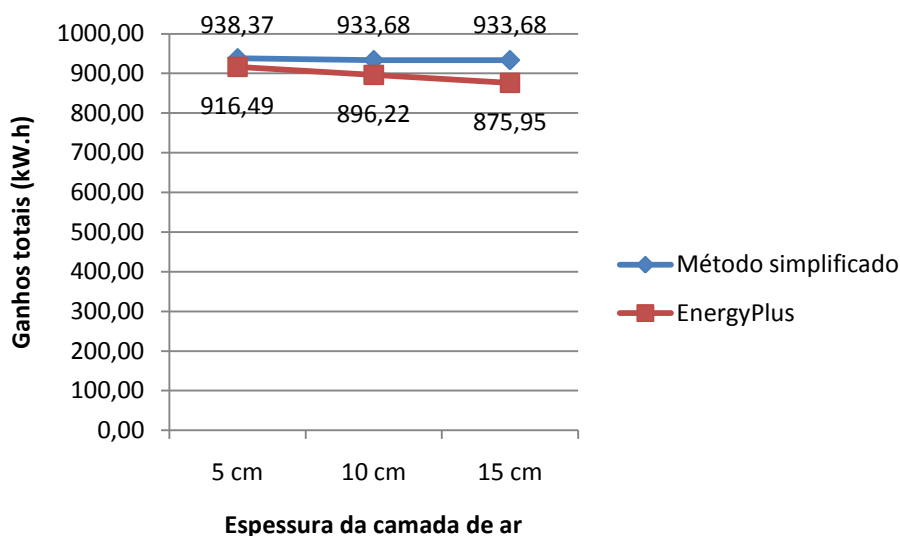


Fig. 5. 15 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Porto.

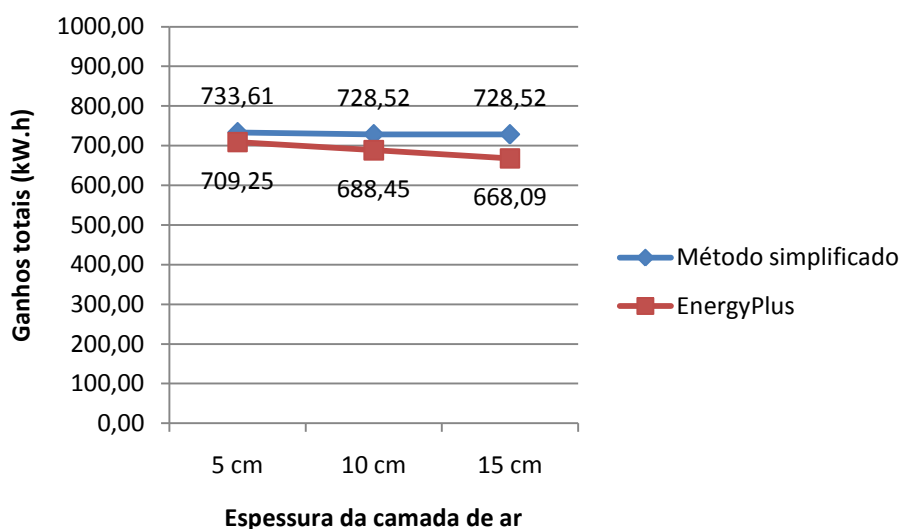


Fig. 5. 16 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para as três espessuras da camada de ar – Bragança.

Para a zona climática de Bragança (figura 5.16), a análise é idêntica à realizada para o caso do Porto. A diferença média entre metodologias é, contudo, ligeiramente superior. Os resultados obtidos pelo método simplificado são cerca de 6% superiores aos obtidos pelo EnergyPlus (3% para a espessura de 5cm, 6% para a de 10cm e 8% para a de 15cm).

A diferença média entre métodos para os ganhos totais para a variável espessura da camada de ar parece estar em concordância com os valores obtidos para a variável espessura do elemento opaco, alcançando percentagens de divergência semelhantes (10% para Lisboa, 4% para o Porto e 5% para Bragança).

5.2.3.2. Necessidades nominais de aquecimento

Os gráficos das figuras 5.17, 5.18 e 5.19 representam as necessidades nominais de aquecimento para a habitação com parede de armazenamento em função da espessura da camada de ar da parede de armazenamento, obtidas pelo método “RCCTE modificado” e pelo método do EnergyPlus, para as três zonas em estudo.

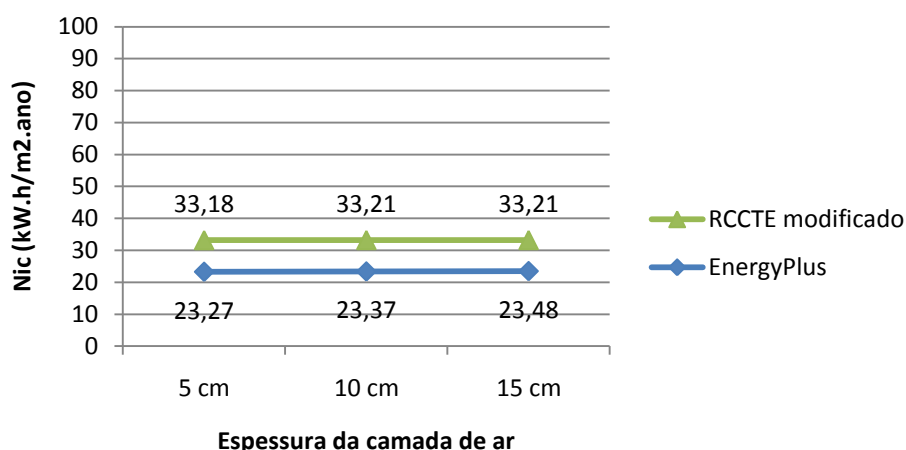


Fig. 5. 17 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Lisboa.

Como seria de esperar, os resultados obtidos pelo método “RCCTE modificado” para as espessuras de 10cm e 15cm são idênticos, para as três zonas climáticas estudadas, tal como se constatou na análise dos ganhos totais. Uma vez que os ganhos totais são idênticos, também as necessidades nominais de aquecimento obtidas são idênticas, visto apenas se ter variado a espessura da camada de ar. Existe um acréscimo apenas quando se passa de 5cm para 10cm, ao passo que para a metodologia do EnergyPlus observa-se um ligeiro acréscimo à medida que se aumenta a espessura da camada de ar para as três espessuras estudadas.

Em relação à zona climática de Lisboa (figura 5.17), observa-se que os resultados obtidos pelo método “RCCTE modificado” são superiores em cerca de $10 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ em relação aos obtidos pelo método do EnergyPlus, para cada espessura de camada de ar. Esta divergência (entre “RCCTE modificado” e EnergyPlus) parece estar em concordância com a obtida para a situação inicial, isto é, para a habitação sem parede de armazenamento (o RCCTE originou valores $9 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ superiores ao EnergyPlus).

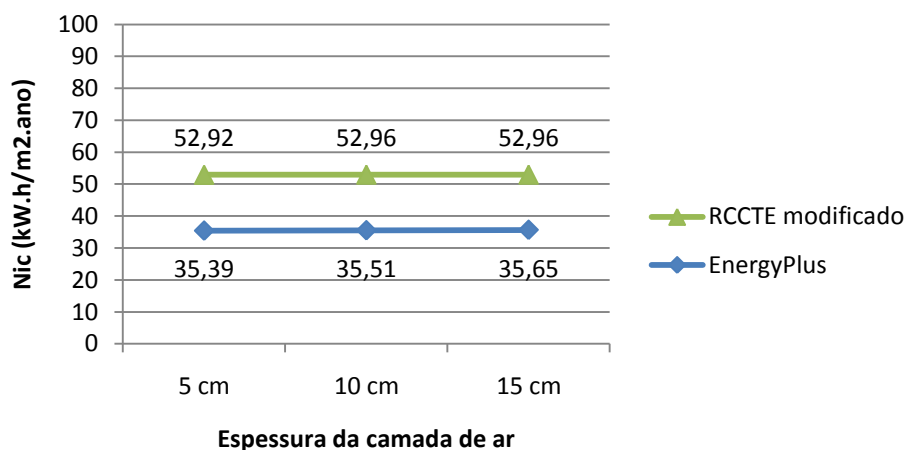


Fig. 5. 18 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Porto.

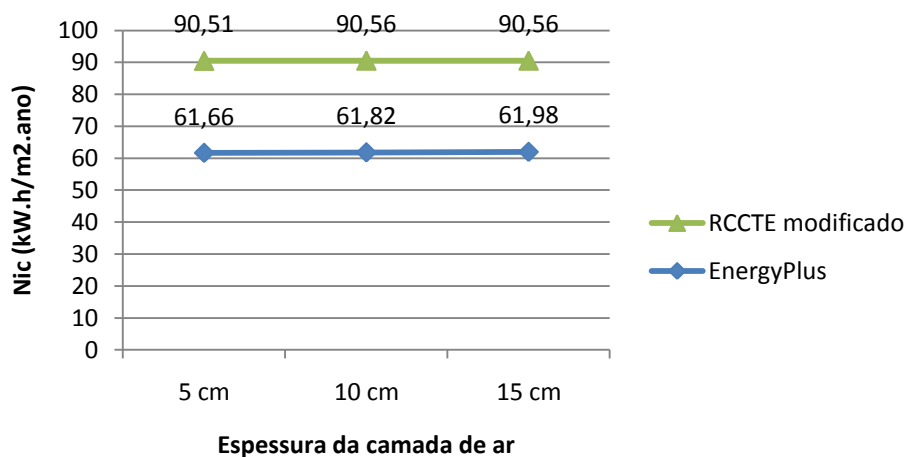


Fig. 5. 19 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para as três espessuras da camada de ar – Bragança.

Uma análise semelhante pode ser feita para as zonas do Porto e de Bragança. No caso do Porto (figura 5.18) a diferença entre o método “RCCTE modificado” e o método do EnergyPlus é de $18 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para a espessura de 5cm e de $17 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para as restantes duas espessuras ($20 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para a situação inicial).

Para Bragança (figura 5.19) a diferença entre metodologias é de $29 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para as três espessuras estudadas ($30 \text{ kW.h/m}^2.\text{ano}$ para a situação inicial).

Nos gráficos das figuras 5.20, 5.21 e 5.22 estão patentes, para Lisboa, Porto e Bragança respectivamente, as percentagens de redução das necessidades nominais de aquecimento da habitação em estudo com a introdução da parede de armazenamento em função da espessura da camada de ar. A percentagem de redução do índice N_{ic} traduz a diminuição das necessidades nominais de aquecimento com a introdução da parede de armazenamento em relação ao seu valor inicial, isto é, para a habitação sem parede de armazenamento (figura 5.1).

Os resultados das reduções das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo método “RCCTE modificado” não apresentam alterações significativas em função das três espessuras estudadas, ao contrário do que acontece com o método EnergyPlus em que se observa uma pequena diminuição à medida que se aumenta a referida espessura.

De notar que as diferenças entre as reduções do índice N_{ic} obtidas pelos dois métodos estão em concordância com os resultados obtidos quando se fez variar a espessura do elemento opaco. Para Lisboa (figura 5.20), observa-se que a percentagem de redução obtida pelo EnergyPlus é superior à obtida pelo “RCCTE modificado” em cerca de 6,4% (6,7% para a espessura de 5cm, 6,4% para a de 10cm e 6,0% para a de 15cm).

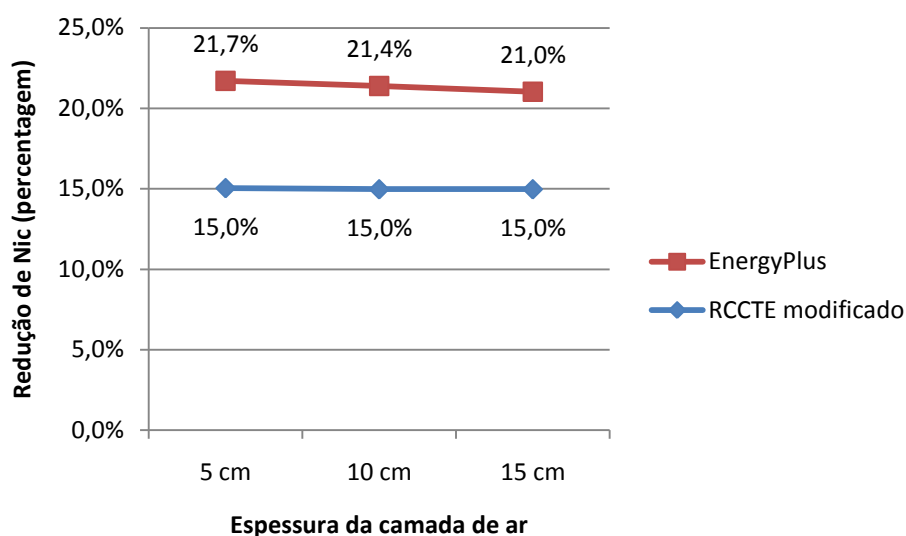


Fig. 5. 20 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Lisboa.

Para o Porto (figura 5.21) a diferença entre metodologias é praticamente nula (cerca de meio ponto percentual) e para Bragança é cerca de 2% (figura 5.22).

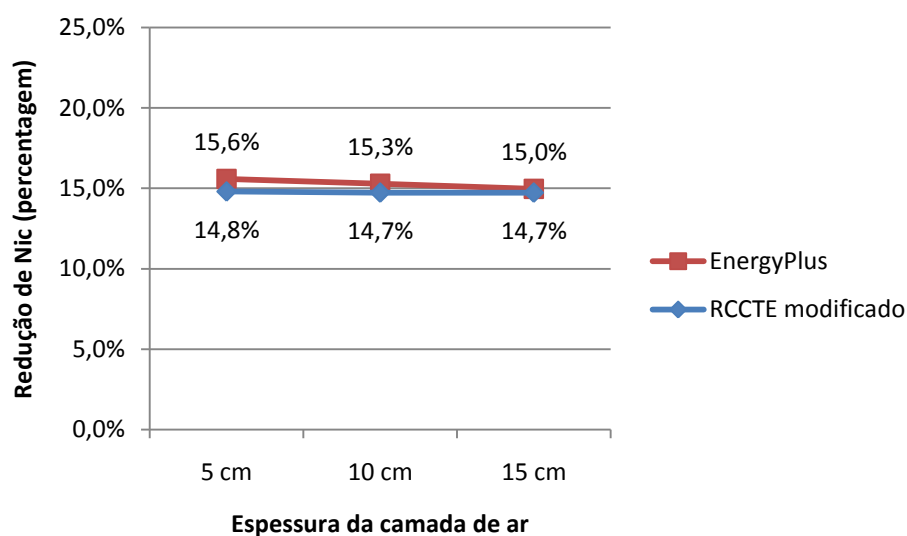


Fig. 5. 21 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Porto.

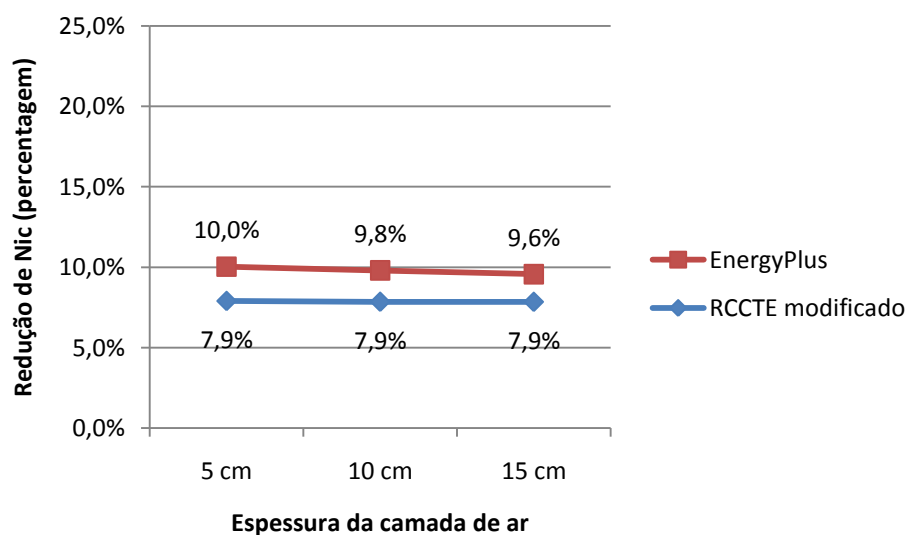


Fig. 5. 22 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para as três espessuras de camada de ar – Bragança.

A diferença média entre métodos para a percentagem de redução do índice N_{ic} (para cada zona) mostra estar em concordância com os valores obtidos para a variável espessura do elemento opaco, apresentando percentagens de divergência idênticas (5% para Lisboa, 0,5% para o Porto e 2% para Bragança).

O quadro 5.11 apresenta a diferença percentual das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelas duas metodologias estudadas para a situação inicial e para as situações em que se introduziu uma parede de armazenamento (com espessuras da camada de ar de 5cm, 10cm e 15cm), para as zonas climáticas de Lisboa, Porto e Bragança. Para a situação inicial é representada a

percentagem em que os resultados obtidos pelo RCCTE são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Para as espessuras da camada de ar de 5cm, 10cm e 15cm é representada a percentagem em que os resultados obtidos pelo “RCCTE modificado” são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus.

Constata-se que, para o caso de Lisboa, o valor das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo RCCTE são 24% superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Com a introdução do método simplificado, essa diferença subiu, em média, para cerca de 30% (a divergência aumentou 6%). Para o caso do Porto, tanto para a situação inicial como para as situações da introdução do método simplificado no RCCTE, a diferença entre metodologias manteve-se praticamente igual (33%). No caso de Bragança, a diferença percentual entre metodologias é de 30% para a situação inicial e de 32% para os restantes casos (a divergência aumentou 2%).

Quadro 5. 11 – Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para as três espessuras da camada de ar – Lisboa, Porto e Bragança.

		N_{ic} (kW.h/m ² .ano)		Diferença percentual de N_{ic}
Lisboa	Inicial	RCCTE	39,06	24%
		EnergyPlus	29,73	
	5 cm	RCCTE modificado	33,18	30%
		EnergyPlus	23,27	
	10 cm	RCCTE modificado	33,21	30%
		EnergyPlus	23,37	
	15 cm	RCCTE modificado	33,21	29%
		EnergyPlus	23,48	
Porto	Inicial	RCCTE	62,11	33%
		EnergyPlus	42,92	
	5 cm	RCCTE modificado	52,92	33%
		EnergyPlus	35,39	
	10 cm	RCCTE modificado	52,96	33%
		EnergyPlus	6,41	
	15 cm	RCCTE modificado	53,03	33%
		EnergyPlus	35,65	
Bragança	Inicial	RCCTE	98,28	30%
		EnergyPlus	68,54	
	5 cm	RCCTE modificado	90,51	32%
		EnergyPlus	61,66	
	10 cm	RCCTE modificado	90,56	32%
		EnergyPlus	61,82	
	15 cm	RCCTE modificado	90,56	32%
		EnergyPlus	61,98	

Também para a variável espessura da camada de ar, os resultados parecem apontar para uma melhor adaptação do método simplificado para a zona climática do Porto, seguida da zona climática de Bragança e, finalmente, da zona de Lisboa.

5.2.4. Análise do material do elemento opaco

A terceira variável em estudo é o material de armazenamento térmico do elemento opaco. Foram analisados os resultados obtidos para dois materiais: betão e pedra. Para tal, foi definida uma espessura de 20cm para o elemento opaco e de 10cm para a camada de ar. Os valores obtidos para os coeficientes de transmissão térmica total e exterior, área colectora efectiva e coeficiente de perda de calor da parede de armazenamento (para Lisboa, Porto e Bragança) podem ser consultados no anexo 4.

5.2.4.1. Ganhos térmicos totais através da parede de armazenamento

Analisando o andamento dos ganhos térmicos totais em função do material de armazenamento térmico, pode constatar-se que os resultados obtidos pelo método simplificado adoptado seguem a tendência dos resultados apresentados pelo EnergyPlus, para as três zonas em estudo. Com efeito, à semelhança do que se observou nas duas variáveis analisadas anteriormente, a diferença entre métodos mantém-se praticamente constante quando se faz variar o material do elemento opaco.

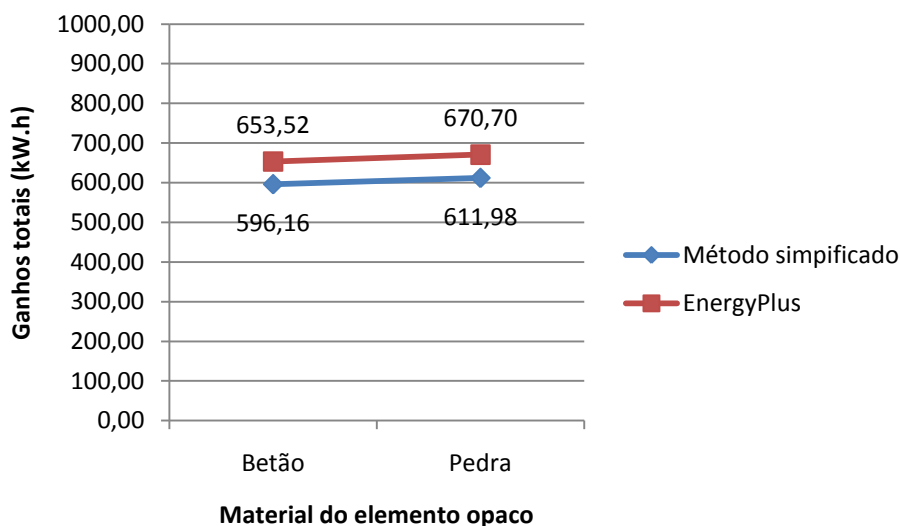


Fig. 5. 23 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.

No caso de Lisboa (figura 5.23), os ganhos totais obtidos pelo EnergyPlus são ligeiramente superiores aos obtidos pelo método simplificado. Esta diferença mantém-se igual para os dois materiais de armazenamento térmico, situando-se nos 9%.

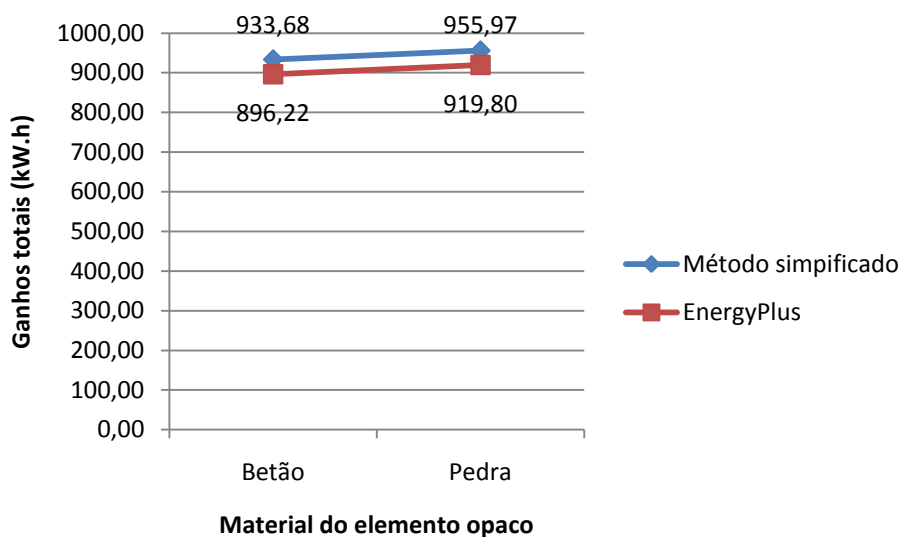


Fig. 5. 24 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Porto.

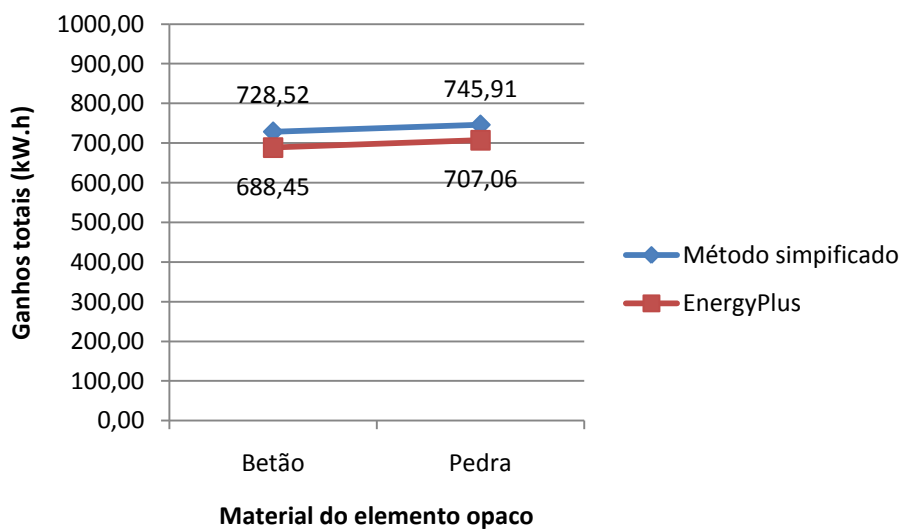


Fig. 5. 25 - Ganhos totais através da parede de armazenamento pelo método simplificado e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.

Já nos casos do Porto (figura 5.24) e de Bragança (figura 5.25) observa-se que os ganhos totais pelo método simplificado são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus.

Para o Porto, a diferença entre metodologias é de 4% e para Bragança ascende aos 6%, para cada material de armazenamento térmico. As diferenças observadas entre metodologias para os ganhos totais (para as três zonas) são idênticas às observadas para as duas variáveis estudadas anteriormente (espessura do elemento opaco e espessura da camada de ar).

5.2.4.2. Necessidades nominais de aquecimento

Os três gráficos que seguem apresentam as necessidades nominais de aquecimento (para Lisboa, Porto e Bragança) obtidas para a habitação com a parede de armazenamento em função do material do elemento opaco, recorrendo às duas metodologias em estudo (“RCCTE modificado” e EnergyPlus).

Mais uma vez, observa-se a tendência dos resultados apresentados pelas simulações efectuadas através do EnergyPlus seguirem os resultados obtidos pelo método “RCCTE modificado”. Efectivamente, as necessidades nominais de aquecimento aumentam em razão semelhante quando se utiliza pedra em vez de betão, para as três localizações em estudo.

Para Lisboa (figura 5.26), a diferença entre metodologias para os dois materiais é de 10 $kW.h/m^2.ano$ (RCCTE e EnergyPlus diferem em 9 $kW.h/m^2.ano$ para a situação inicial).

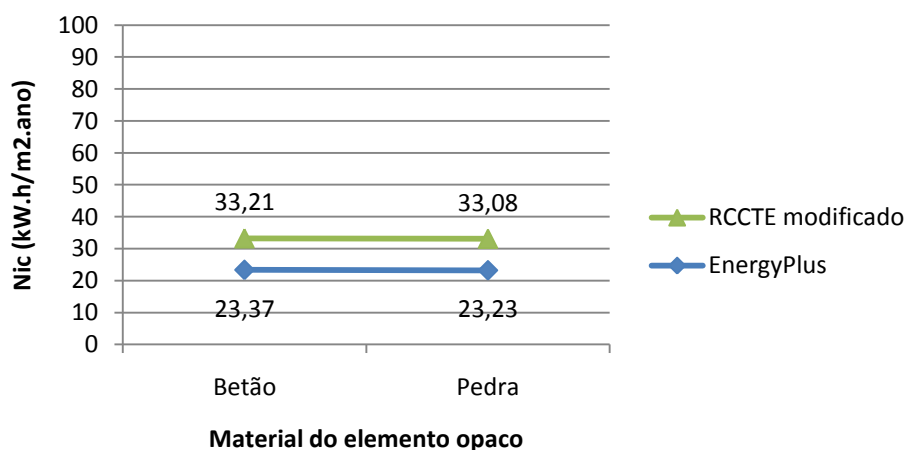


Fig. 5. 26 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.

No caso do Porto (figura 5.27) a diferença entre metodologias atinge os 17 $kW.h/m^2.ano$ (20 $kW.h/m^2.ano$ para a situação inicial) para cada material de armazenamento térmico. Para Bragança (figura 5.28) a diferença ascende aos 29 $kW.h/m^2.ano$ (30 $kW.h/m^2.ano$ para a situação inicial).

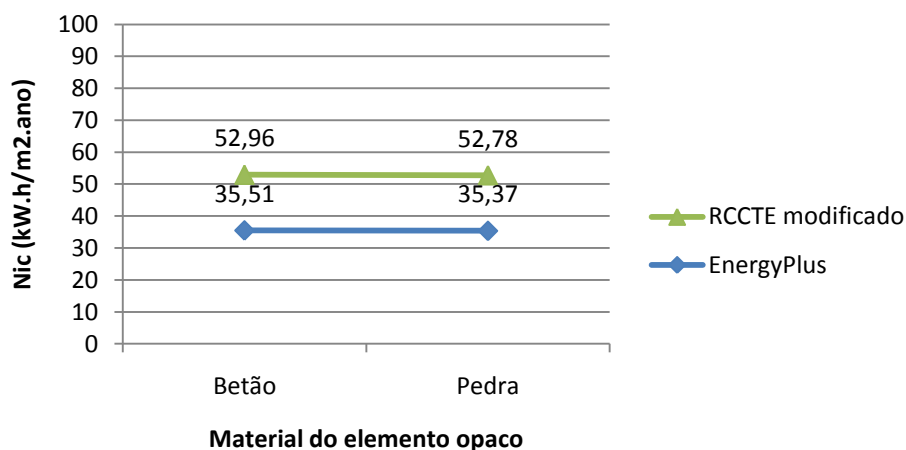


Fig. 5. 27 - Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Porto.

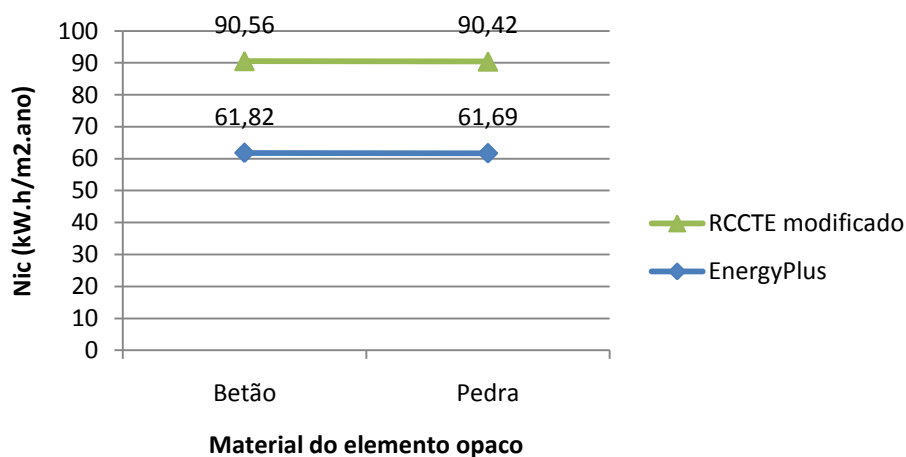


Fig. 5. 28 – Necessidades nominais de aquecimento para a situação com parede de armazenamento para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.

Nos gráficos das figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam-se, para as três localidades estudo, as reduções do índice N_{ic} para a habitação com parede de armazenamento constituído por betão e pedra, em relação às necessidades nominais de aquecimento obtidos para a situação inicial (habitação sem parede de armazenamento).

As reduções das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” são cerca de 7 % inferiores às obtidas pelo EnergyPlus, para os dois materiais em estudo, para a zona climática de Lisboa (figura 5.29). No Porto essa diferença decresce para cerca meio ponto percentual (figura 5.30), e em Bragança a diferença nas reduções do índice N_{ic} é de cerca de 2% (figura 5.31). Estes resultados estão também em concordância com os valores obtidos para as duas variáveis anteriormente estudadas, ou seja, apresentam divergências semelhantes.

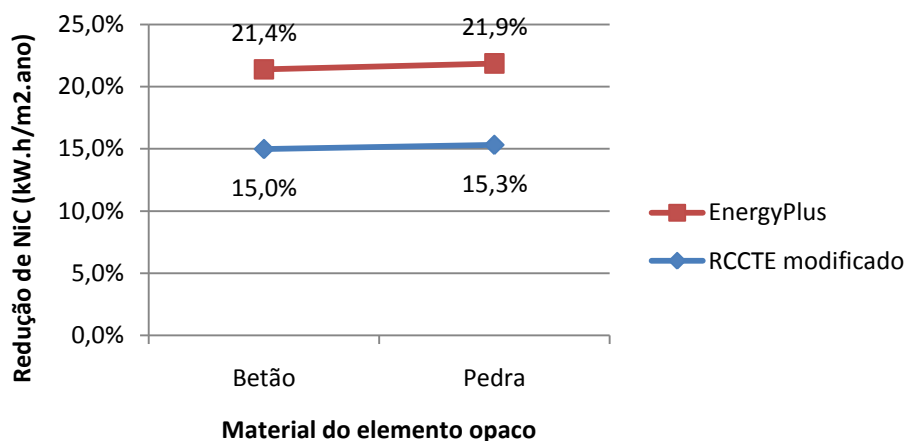


Fig. 5. 29 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa.

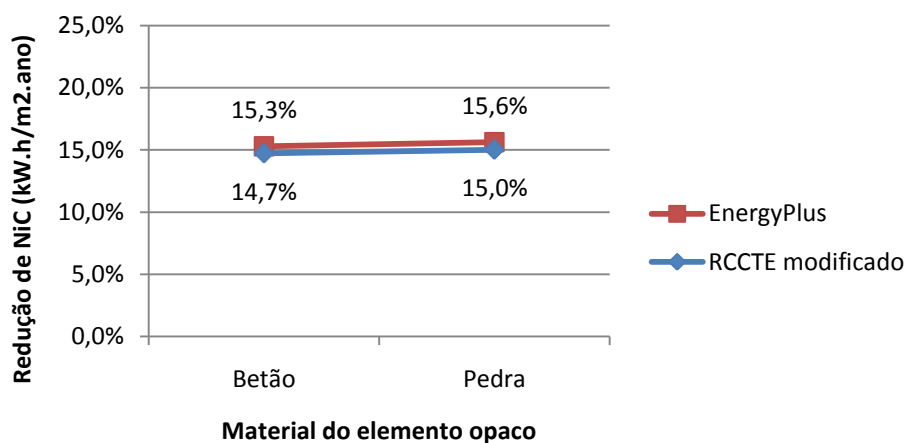


Fig. 5. 30 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Porto.

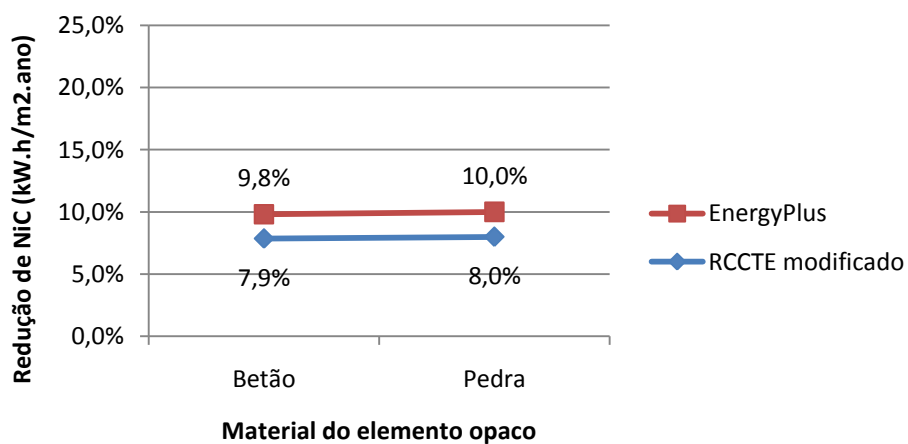


Fig. 5. 31 - Redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo “RCCTE modificado” e pelo EnergyPlus para os dois materiais do elemento opaco – Bragança.

O quadro 5.12 apresenta a diferença percentual entre os resultados das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelas duas metodologias estudadas (estática e dinâmica). Para a situação inicial é representada a percentagem em que os resultados obtidos pelo RCCTE são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Para os dois materiais de armazenamento térmico (betão e pedra) é representada a percentagem em que os resultados obtidos pelo “RCCTE modificado” são superiores aos obtidos pelo EnergyPlus. Observa-se que, para o caso de Lisboa, a divergência entre métodos aumentou cerca de 6% com a introdução do método simplificado no RCCTE, relativamente à diferença para a situação inicial. Para o caso do Porto, tanto para a situação inicial como para as situações da introdução do método simplificado adoptado no RCCTE, a diferença entre metodologias manteve-se praticamente igual (33%). No caso de Bragança, a diferença percentual entre metodologias é de 30% para a situação inicial e de 32% para os restantes casos (a divergência aumentou 2%).

Quadro 5. 12 - Diferença percentual de necessidades nominais de aquecimento entre metodologias para a situação inicial e para os dois materiais do elemento opaco – Lisboa, Porto e Bragança.

		N_{ic}		Diferença percentual de N_{ic}
Lisboa	Inicial	RCCTE	39,06	24%
		EnergyPlus	29,73	
	Betão	RCCTE modificado	33,21	30%
		EnergyPlus	23,37	
	Pedra	RCCTE modificado	33,08	30%
		EnergyPlus	23,23	
Porto	Inicial	RCCTE	62,11	33%
		EnergyPlus	41,92	
	Betão	RCCTE modificado	52,96	33%
		EnergyPlus	35,51	
	Pedra	RCCTE modificado	52,78	33%
		EnergyPlus	35,37	
Bragança	Inicial	RCCTE	98,28	30%
		EnergyPlus	68,54	
	Betão	RCCTE modificado	90,56	32%
		EnergyPlus	61,82	
	Pedra	RCCTE modificado	90,42	32%
		EnergyPlus	61,69	

Os resultados obtidos para as diferenças entre as necessidades nominais de aquecimento obtidas pelos dois métodos estão no seguimento do que já se tinha observado para as outras duas variáveis estudadas. Com efeito, estes resultados sugerem uma melhor adaptação do método simplificado para a zona climática do Porto, seguida da zona climática de Bragança e, por fim, Lisboa.

6. CONCLUSÕES

Expostos os resultados e efectuadas todas as análises, apresentam-se neste capítulo, de uma forma breve e sintética, as conclusões e observações finais. Adicionalmente, são propostos assuntos para desenvolvimento futuro considerados importantes, de modo a complementar as conclusões obtidas no presente trabalho.

Este trabalho permitiu avaliar o impacto energético de uma parede de armazenamento inserida numa habitação, durante a estação de aquecimento, através dos parâmetros: localização geográfica e solução construtiva da parede de armazenamento (espessura do elemento opaco, espessura da camada de ar e material de armazenamento térmico) nas necessidades nominais de aquecimento, recorrendo a um método simplificado aplicado ao RCCTE e à metodologia do EnergyPlus.

6.1. Validade do método simplificado

Em relação à validade do método simplificado estudado no presente trabalho e à sua adequabilidade ao clima português, é possível afirmar que os resultados obtidos são bastante promissores, na medida em que mostram consistência quando comparados com os resultados obtidos pela ferramenta de simulação dinâmica EnergyPlus. Olhando para os valores médios dos ganhos totais através da parede de armazenamento para cada uma das três zonas estudadas, obtidos pelo método simplificado e pelo método preconizado pelo EnergyPlus, observam-se divergências bastante pequenas. Para Lisboa, a divergência média entre métodos observada é de 9%, enquanto que para a zona do Porto é de 4% e para a zona de Bragança é de 6%. Uma vez que o método do EnergyPlus para paredes de armazenamento térmico simples foi validado experimentalmente [17, 38], é legítimo afirmar que o método simplificado apresentou resultados válidos para o clima português (no que respeita às variáveis estudadas e pressupostos adoptados), dadas as pequenas divergências obtidas.

Quanto à validade da aplicação do método simplificado na metodologia de cálculo do RCCTE, é necessário examinar as percentagens de redução das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo método “RCCTE modificado” e pelo método do EnergyPlus (quadro 6.1). As percentagens de redução das necessidades de aquecimento correspondem à diminuição do índice N_{ic} com a introdução da parede de armazenamento térmico na habitação.

Quadro 6. 1 – Percentagens médias de redução das necessidades nominais de aquecimento obtidos pelo método “RCCTE modificado” e pelo método do EnergyPlus.

	Lisboa	Porto	Bragança
EnergyPlus	20,7%	15,1%	9,7%
"RCCTE modificado"	14,8%	14,5%	7,8%

Em média, o método “RCCTE modificado” originou percentagens de redução inferiores às obtidas pelo método do EnergyPlus em 5,9% para Lisboa, 0,6% para o Porto e 1,9% para Bragança. De facto, estes valores parecem apontar para uma boa adaptação do método simplificado na metodologia de cálculo do RCCTE, na medida em que se obtiveram divergências muito pequenas em relação ao método do EnergyPlus. De salientar o facto de que, uma vez que o método “RCCTE modificado” originou valores inferiores aos obtidos pelo método do EnergyPlus, foi mantida a índole conservativa que caracteriza a metodologia de cálculo do RCCTE. A apoiar a validade do método “RCCTE modificado” estão os valores obtidos para as divergências entre métodos (estático e dinâmico) no que respeita as necessidades nominais de aquecimento, quando se passa da situação inicial (sem parede de armazenamento) para a situação com parede de armazenamento (quadro 6.2).

Quadro 6. 2 – Valores médios da diferença percentual entre metodologias para as necessidades nominais de aquecimento.

	Lisboa	Porto	Bragança
Entre RCCTE e EnergyPlus (situação inicial)	24%	33%	30%
Entre "RCCTE modificado" e EnergyPlus (com parede de armazenamento térmico)	29%	33%	32%

A divergência média entre métodos aumentou 5% para Lisboa e 2% para Bragança, com a introdução do método simplificado no RCCTE. No caso do Porto, a divergência observada para a situação inicial (entre RCCTE e EnergyPlus) manteve-se igual à divergência observada na situação em que se introduziu o método simplificado no RCCTE (entre “RCCTE modificado” e EnergyPlus).

Olhando apenas para as reduções das necessidades nominais de aquecimento obtidas pelo método “RCCTE modificado”, conclui-se que os valores médios obtidos para cada zona em estudo estão em concordância com resultados de estudos publicados para este tipo de sistemas.

Quadro 6. 3 – Gama de percentagens de redução do índice N_{ic} obtidas pelo método “RCCTE modificado” – Lisboa, Porto e Bragança.

	Lisboa	Porto	Bragança
Percentagem de redução das necessidades nominais de aquecimento	13,7 - 15,3%	13,6 - 15,0%	7,3 - 8,0%

Para Lisboa e Porto, obtiveram-se reduções máximas das necessidades nominais de aquecimento na ordem dos 15%, enquanto que para Bragança a redução toma valores máximos de 8%. Efectivamente, a gama de valores obtidos (quadro 6.3) está em linha com os resultados de um estudo efectuado num clima mediterrâneo - onde os resultados obtidos através de simulações no EnergyPlus foram validados

através de resultados experimentais - em que se obtiveram reduções nas necessidades nominais de aquecimento de 12,2%⁴.

Em termos globais, os resultados parecem apontar para uma melhor adaptação do método simplificado para a zona climática do Porto (observou-se uma maior convergência de resultados entre os dois métodos), seguida da zona climática de Bragança e, por fim, da zona climática de Lisboa. Contudo, é possível concluir que o método simplificado estudado mostra uma boa adaptabilidade ao clima português, abrindo boas perspectivas quanto à sua introdução no regulamento térmico dos edifícios residenciais.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se a extensão do estudo do método simplificado para outras soluções construtivas da parede de armazenamento térmico simples, nomeadamente a utilização de outros materiais de armazenamento térmico. É ainda proposto o estudo do seu comportamento térmico em outras zonas do país e o alargamento do método simplificado para o impacto de paredes de armazenamento térmico durante a estação de arrefecimento. A determinação da área óptima da parede de armazenamento térmico e o estudo do comportamento térmico para outras tipologias construtivas do edifício em que se insere são também pontos importantes para serem estudados futuramente. Por fim, propõe-se a comparação dos resultados alcançados pelo método simplificado estudado com outros métodos simplificados (SLR por exemplo), outros métodos de simulação dinâmica (TRNSYS por exemplo) e resultados de trabalhos experimentais.

⁴ Para um edifício residencial em Itália, dotado de uma parede de armazenamento térmico constituída por uma parede de betão com 40cm de espessura (superfície exterior preta) e uma camada de ar com 10cm de espessura. A temperatura de referência do ambiente interior é de 20°C.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Comissão Europeia (CE); Directorate-General for Energy (DGE) - *Eficiência Energética em Edifícios*, <<http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/>>, 2011.
- [2] CASTANHEIRA, L.; GOUVEIA, J. - *Energia, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável*, Sociedade Portuguesa de Inovação (SPI), 2004.
- [3] EnergyPlus - *Energy Simulation Software*, <apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, 2011.
- [4] PIRES, Luís *et al.* - *A Importância do Consumo Energético dos Edifícios na Europa: Soluções propostas para a sua redução*, Universidade da Beira Interior, 2005.
- [5] ISOLANI, Pieraldo *et al.* - *Eficiência Energética em Edifícios Residenciais*, Agência para a Energia (ADENE), 2008.
- [6] SILVA, S.; ALMEIDA, M. - *Avaliação do Impacto Energético e Económico de Diferentes Soluções Construtivas*, Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil, 2003.
- [7] End-use Efficiency Research Group - *Passive-On Project*, Instituto Politécnico de Milão, Itália, 2007.
- [8] DECRETO-LEI n.º 80/2006, de 4 de Abril - *RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, 2006.
- [9] Direcção-Geral da Empresa (DGE); Programa Operacional da Economia (POE) - *Programa Nacional para a Eficiência nos Edifícios*, 2007.
- [10] Šúri M. *et al.* - *Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries*, Comissão Europeia (CE) – Joint Research Centre and the European Solar Test Installation, 2007.
- [11] TZIKOPOULOS, A.F. *et al.* - *Modeling Energy Efficiency of Bioclimatic Buildings*, Energy and Buildings, Volume 37, págs. 529-544, 2005.
- [12] GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. - *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*, Direcção-Geral de Energia e Geologia - DGGE/IP-3E, 2004.

- [13] MENDONÇA, Paulo - *Habitar Sob uma Segunda Pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados*; Capítulo V - Tecnologias Solares Passivas, Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, 2005.
- [14] TROMBE, Félix *et al.* - *Concrete Walls to Collect and Hold Heat*, Solar Age, Volume 2, Nº 8, 1977.
- [15] WINTER, Steve - *The Passive Solar Design and Construction Handook*, EUA, Wiley Publishers, 1997.
- [16] ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LIBRARY - *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*, Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), EUA, 2010.
- [17] ELLIS, Peter - *Development and Validation of the Unvented Trombe Wall Model in EnergyPlus*, Tese de Mestrado, EUA, University of Illinois, 1995.
- [18] ATHIENITIS, A.; RAMADAN, H. - *Numerical Model of a Building with Transparent Insulation*, Solar Energy Volume 67, Números 1-3, págs. 101-109, 1999.
- [19] ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LIBRARY - *EnergyPlus Input Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), EUA, 2010.
- [20] JJUREIDINI - *Trombe Wall Case Studies*, <<http://jjureidini.wordpress.com/2011/01/18/trombe-wall-case-studies/>>, 2011.
- [21] LIDERA (Sustainable Assessment System) - *Certificações (Casa Oásis)*, <www.lidera.info.pt/>, 2007.
- [22] AGÊNCIA DE ENERGIA DO PORTO (AdePorto) – *Casa-Laboratório Termicamente Optimizada – CTO*, <www.adeporto.eu/cga>, 2007.
- [23] BOND, Martin - *Science Photo Library*, <www.sciencephoto.com/media/>, 2011.
- [24] MACHADO, Lu – *Construções de Baixo Impacto*, <www.arquitecturaeficiente.com.br>, 2010.

- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO/FDIS 13790:2007 - *Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*, 2007.
- [26] CORRADO, Vincenzo *et al.* - *Building Energy Performance Assessment Trough Simplified Models: Application of the ISO 13790 Quasi-Steady State Method*, Proceedings: Building Simulation 2007, Departamento de Energia do Politécnico de Turim (DENER), Itália, 2007.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - EN ISO 13789:2007 - *Thermal Performance of Buildings – Transmission and Ventilation Heat Transfer Coefficients – Calculation Method*, 2007.
- [28] SANTOS, C.; MATIAS, L. - *ITE 50: Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 2006.
- [29] AELENEI, Daniel - *RCCTE “Light” – Sobre o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (versão de Maio de 2009)*, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), 2009.
- [30] Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) - Ficheiro climático de Lisboa; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) - Ficheiro climático do Porto e de Bragança, < <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>, 2011.
- [31] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 15099:2000 - *Thermal Performance on Windows, Doors and Shading Devices – Detailed Calculations*, 2000.
- [32] COMISSÃO EUROPEIA (CE) - *Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios*, *Jornal Oficial da União Europeia*, Maio de 2010.
- [33] SHEN, Jibao *et al.* - *Numerical Study on Thermal Behaviour of Classical or Composite Trombe Solar Walls*, *Energy and Buildings*, Volume 39, págs. 962-974, 2007.
- [34] TORCELLINI, P.; PLESS, S. - *Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences*, Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE), EUA, 2004.

- [35] TORCELLINI, P. *et al.* - *Evaluation of the Low-Energy Design and Energy Performance of the Zion National Park Visitor Center*, relatório do NREL n.º TP-550-34607, Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), EUA, 2004.
- [36] BALCOMB, D.; HEDSTROM, J.C. - *Determining Heat Fluxes from Temperature Measurements in Massive Walls*, 5th National Passive Solar Conference, EUA, 1980.
- [37] ZALEWSKI, S. *et al.* - *Study of Solar Walls – Validating a numerical simulation model*, International Review on Building and Environment n.º37, págs. 109-121, 2002.
- [38] STAZI, F. *et al.* - *Experimental and Numerical Study on the Performance of Solar Walls in Mediterranean Climates*, World Renewable Energy Congress 2011 – Low-Energy Architecture (LEA), Suécia, 2011.
- [39] AELENEI, Daniel - *Física das Construções – Apontamentos das Aulas Teóricas*, Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), 2007.

ANEXOS

Anexo 1 – Inércia térmica da habitação e características térmicas dos materiais utilizados

Valores da inércia térmica da habitação em estudo com e sem parede de armazenamento.

Imposições regulamentares:

Localização	Elemento Tipo	Com Isolamento	Sem Isolamento
Elemento exterior	EL 1	$Msi = mi \leq 150 \text{ kg/m}^2$	$Msi = mt/2 \leq 150 \text{ kg/m}^2$
Elemento em contacto com outra fracção autónoma			

Paredes exteriores:

Material	$e \text{ (m)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$mi \text{ (Kg/m}^2\text{)}$
Reboco	0,015	1800	27
Tijolo furado 11	0,11	1200	132

Elementos horizontais da envolvente em contacto com o interior (laje de pavimento):

Material	$e \text{ (m)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$mi \text{ (Kg/m}^2\text{)}$
Betonilha	0,04	2000	80
Betão Armado	0,15	2300	345
Ladrilho Cerâmico	0,01	1200	12

Parede de armazenamento:

Material	$e \text{ (m)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$mi \text{ (Kg/m}^2\text{)}$
Betão	0,2	2300	460

Elementos horizontais da envolvente em contacto com o exterior (cobertura):

Material	$e \text{ (m)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$mi \text{ (Kg/m}^2\text{)}$
Impermeabilização	0,003	900	2,7
Betonilha	0,1	2000	200
Laje B.A.	0,15	2300	345
Reboco	0,03	1800	54

Inércia térmica da habitação – situação inicial:

Elemento	$mi \text{ (kg/m}^2\text{)}$	Imposição regulamentar		$Msi \text{ (kg/m}^2\text{)}$	$Si \text{ (m}^2\text{)}$	Factor de correcção (r)	$Msi . r . Si \text{ (kg)}$
Paredes exteriores	159	$mi \leq$	150	150	110	1	16500
Laje de pavimento	437	$mi \leq$	150	150	100	1	15000
Cobertura	601,7	$mi \leq$	150	150	100	1	15000
						Total (kg)	46500

$Ap \text{ (m}^2\text{)}$	100
Inércia Térmica (kg/m^2)	465
Tipo	Forte
	3

Inércia térmica da habitação – com parede de armazenamento:

Elemento	m_i (kg/m ²)	Imposição regulamentar		M_{si} (kg/m ²)	S_i (m ²)	Factor de correcção (r)	$M_{si} \cdot r \cdot S_i$ (kg)
Paredes exteriores	159	$m_i \leq$	150	150	104	1	16500
Parede de Armazenamento	460	$m_i \leq$	150	150	6	1	900
Laje de pavimento	437	$m_i \leq$	150	150	100	1	15000
Cobertura	601,7	$m_i \leq$	150	150	100	1	15000
						Total (kg)	46500

A_p (m ²)	100
Inércia Térmica (kg/m ²)	465
Tipo	Forte
	3

Características térmicas dos materiais usados nos elementos construtivos da habitação:

Material	Condutibilidade (W/m°C)	Massa Volúmica (Kg/m ³)	Calor Específico (MW.h/Kg°C)
Reboco	1,3	1800	0,2778
Tijolo Furado	0,275	1200	0,0992
Ladrilhos	0,5	1200	0,2325
Betonilha	1,65	2000	0,2778
EPS	0,04	20	0,3611
Betão Armado	2,0	2300	0,2444
XPS	0,037	30	0,4167
Lajetas	0,3125	1000	0,2306
Impermeabilização	0,023	900	1,1556
Madeira de pinheiro (densa)	0,23	800	0,7556
Pedra calcária	2,3	2300	0,2333

Anexo 2 – Folhas de cálculo do RCCTE

No presente anexo são expostas as folhas de cálculo do método do RCCTE (para a habitação com e sem parede de armazenamento) para as zonas climáticas de Lisboa, Porto e Bragança, no que respeita a ganhos (solares, internos e úteis totais) e necessidades nominais de aquecimento – N_{ic} . A parede de armazenamento usada nas folhas de cálculo aqui expostas, é constituída por betão com 20cm de espessura e uma camada de ar de 10cm de espessura.

Anexo 2.1. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Lisboa

Folha de cálculo FC IV.1d:

Área Útil de Pavimento		100,0	(m ²)
		x	
Pé-direito médio		3,0	(m)
		=	
Volume interior	(V)	300,00	(m ³)

VENTILAÇÃO NATURAL			
Cumprir a NP 1037-1?	(S ou N)	S	se SIM: RPH = 0,6
Se NÃO:			
Classe da Caixilharia	(s/c, 1, 2 ou 3)		<div>Taxa de Renovação Nominal:</div> <div>RPH= 0,6</div>
Caixas de Estore	(S ou N)		
Classe de Exposição	(1, 2, 3 ou 4)		
Aberturas auto-reguláveis?	(S ou N)		
Área de envidraçados > 15% Ap?	(S ou N)		
Portas Exteriores bem vedadas?	(S ou N)		

Volume		300,00	
		x	
Taxa de Renovação Nominal		0,6	
		x	
		0,34	
		=	
TOTAL		61,20	(W/°C)

Folha de cálculo FC IV.1e – ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno):

Ganhos solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m^2)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (G_{sul}) ($kWh/m^2.mês$) na zona 11 ($kWh/m^2.mês$)	99,27
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	4,4
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	450,87

Ganhos internos:

Ganhos internos médios	4,00	(W/m^2)
	x	
Duração da Estação de Aquecimento	4,40	(meses)
	x	
Área Útil de pavimento	100,00	(m^2)
	x	
	0,72	
	=	
Ganhos Internos Brutos	1267,20	(kWh/ano)

Ganhos Úteis Totais:

$\gamma = \frac{\text{Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$	1718,07	
	5615,55	
Inércia do edifício: 3	$a = 4,2$	$\gamma = 0,31$
(In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)		
Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos (η)	0,995	
	x	
Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos	1718,07	
	=	
Ganhos Úteis Totais (kWh/ano)	1709,81	

Folha de cálculo FC IV.1f – Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		110,00
Coberturas exteriores		100,00
Pavimentos exteriores		0,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A . τ)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local (°C.dia)		
		1128,00
N _i = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF ≤ 0,5	Auxiliar 49,06
N _i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF ≤ 1	58,79
N _i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF ≤ 1,5	61,93
N _i = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	81,71

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/m².ano)

58,79

Folha de cálculo FC IV.2 – Cálculo do índice NiC:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior (de FCIV.1a)	118,93
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,30
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	207,43
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	1128,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	5615,55
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	1709,81
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	3905,74
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	39,06
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	58,79

REGULAMENTAR

Anexo 2.2. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Porto

Folha de cálculo FC IV.1d:

Área Útil de Pavimento	100,0	(m ²)
	x	
Pé-direito médio	3,0	(m)
	=	
Volume interior (V)	300,00	(m ³)

VENTILAÇÃO NATURAL

Cumpre a NP 1037-1? (S ou N) se SIM: RPH =

Se NÃO:

Classe da Caixilharia (s/c, 1, 2 ou 3)	<input type="text"/>	Taxa de Renovação Nominal: RPH= <input type="text" value="0,6"/>
Caixas de Estore (S ou N)	<input type="text"/>	
Classe de Exposição (1, 2, 3 ou 4)	<input type="text"/>	
Aberturas auto-reguláveis? (S ou N)	<input type="text"/>	
Área de envidraçados > 15% Ap? (S ou N)	<input type="text"/>	
Portas Exteriores bem vedadas? (S ou N)	<input type="text"/>	

Volume	300,00	
	x	
Taxa de Renovação Nominal	0,6	
	x	
	0,34	
	=	
TOTAL	61,20	(W/°C)

Folha de cálculo FC IV.1e – ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno):

Ganhos Solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m ²)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (G _{sul}) na zona	12 (kWh/m ² .mês)
	93,86
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	7,30
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	707,26

Ganhos Internos:

Ganhos internos médios	4,00 (W/m ²)
	x
Duração da Estação de Aquecimento	7,30 (meses)
	x
Área Útil de pavimento	100,00 (m ²)
	x
	0,72
	=
Ganhos Internos Brutos	2102,40 (kWh/ano)

Ganhos úteis totais:

$\gamma = \frac{\text{Ganhos Solares Brutos} + \text{Ganhos Internos Brutos} + \text{Trombe}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$	2809,66
	9005,79
Inércia do edifício:	3,00
a =	4,2
$\gamma =$	0,31
(In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)	
Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos (η)	0,99
	x
Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Ganhos P. Trombe	2809,66
	=
Ganhos Úteis Totais (kWh/ano)	2795,12

Folha de cálculo FC IV.1f – Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		110,00
Coberturas exteriores		100,00
Pavimentos exteriores		0,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A . τ)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local (°C.dia)		
		1809,00
N _i = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF ≤ 0,5	Auxiliar 75,96
N _i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF ≤ 1	91,57
N _i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF ≤ 1,5	96,46
N _i = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	128,60

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/m².ano)

91,57

Folha de cálculo FC IV.2 – Cálculo do índice NiC:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior (de FCIV.1a)	118,93
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,30
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	207,43
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	1809,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	9005,79
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	2795,12
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	6210,67
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	62,11
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	91,57

REGULAMENTAR

Anexo 2.3. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação sem parede de armazenamento – Bragança

Folha de cálculo FCIV.1d :

Área Útil de Pavimento		100,0	(m ²)
		x	
Pé-direito médio		3,0	(m)
		=	
Volume interior	(V)	300,00	(m ³)

VENTILAÇÃO NATURAL

Cumpre a NP 1037-1? (S ou N) se SIM: RPH =

Se NÃO:

Classe da Caixilharia (s/c, 1, 2 ou 3)	<input type="text"/>	Taxa de Renovação Nominal: RPH= <input type="text" value="0,6"/>
Caixas de Estore (S ou N)	<input type="text"/>	
Classe de Exposição (1, 2, 3 ou 4)	<input type="text"/>	
Aberturas auto-reguláveis? (S ou N)	<input type="text"/>	
Área de envidraçados > 15% Ap? (S ou N)	<input type="text"/>	
Portas Exteriores bem vedadas? (S ou N)	<input type="text"/>	

Volume		300,00	
		x	
Taxa de Renovação Nominal		0,6	
		x	
		0,34	
		=	
TOTAL		61,20	(W/°C)

Folha de cálculo FCIV.1e – Ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno):

Ganhos solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m ²)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (Gsul)	
na zona	13 (kWh/m ² .mês)
	95,27
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	6,90
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	678,55

Ganhos internos:

Ganhos internos médios	4,00 (W/m ²)
	x
Duração da Estação de Aquecimento	6,90 (meses)
	x
Área Útil de pavimento	100,00 (m ²)
	x
	0,72
	=
Ganhos Internos Brutos	1987,20 (kWh/ano)

Ganhos úteis totais:

$\gamma = \frac{\text{Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Trombe}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$		2665,75
		12490,61
Inércia do edifício:	3,00	a = 4,2
(In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)		$\gamma = 0,21$
Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos	(η)	1,00
		x
Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Ganhos P. Trombe		2665,75
		=
Ganhos Úteis Totais (kWh/ano)		2662,56

Folha de cálculo FCIV.1f – Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m^2
Paredes exteriores		110,00
Coberturas exteriores		100,00
Pavimentos exteriores		0,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, $A \cdot \tau$)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local ($^{\circ}C.dia$)		
		2509,00
$N_i = 4,5 + 0,0395 \text{ GD}$	Para $FF \leq 0,5$	Auxiliar 103,61
$N_i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) \text{ GD}$	Para $0,5 < FF \leq 1$	125,27
$N_i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) \text{ GD}] (1,2 - 0,2FF)$	Para $1 < FF \leq 1,5$	131,95
$N_i = 4,05 + 0,06885 \text{ GD}$	Para $FF > 1,5$	176,79

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/ m^2 .ano)

125,27

Folha de cálculo FCIV.2 – Cálculo do índice NiC:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior (de FCIV.1a)	118,93
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,30
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	207,43
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	2509,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	12490,61
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	2662,56
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	9828,06
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	98,28
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	125,27

REGULAMENTAR

Anexo 2.4. Folhas de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Lisboa

Folha de cálculo FC IV.1e – ganhos úteis na estação de aquecimento:

Ganhos Solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m ²)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (G _{sul}) na zona	11 (kWh/m ² .mês)
	99,27
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	4,40
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	450,87
Ganhos Parede de Armazenamento (kWh/ano)	841,41

Ganhos úteis totais:

$\gamma =$	Ganhos (Solares Brutos + Internos Brutos + P. Armazenamento)	2559,48
	Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)	5834,87
Inércia do edifício:	3,00	a = 4,2
		$\gamma =$ 0,44
(In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)		
Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos	(η)	0,98
		x
Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Ganhos P. Armazenamento		2559,48
		=
Ganhos Úteis Totais (kWh/ano)		2513,74

Folha de cálculo FC IV.1f – Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		104,00
Coberturas exteriores		100,00
Parede de Armazenamento		6,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A . τ)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local (°C.dia)		1128,00
N _i = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF ≤ 0,5	Auxiliar 49,06
N _i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF ≤ 1	58,79
N _i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF ≤ 1,5	61,93
N _i = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	81,71

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/m².ano)

58,79

Folha de cálculo FC IV.2 – Cálculo do índice NiC:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior incluindo P. Armazenamento (de FCIV.1a)	126,99
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,34
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	215,53
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	1128,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	5834,87
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	2513,74
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	3321,13
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	33,21
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	58,79

REGULAMENTAR

Anexo 2.5. Folha de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Porto

Folha de cálculo FC IV.1e – ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno):

Ganhos Solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m ²)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (Gsul) na zona	12 (kWh/m ² .mês)
	93,86
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	7,30
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	707,26
Ganhos Parede de Armazenamento (kWh/ano)	1324,89

Ganhos úteis totais:

Ganhos Úteis Totais:

$\gamma = \frac{\text{Ganhos (Solares Brutos + Internos Brutos + P. Armazenamento)}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$

Inércia do edifício: 3,00 a = 4,2 $\gamma = 0,44$
 (In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)

Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos (η) 0,98

x

Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Ganhos P. Armazenamento 4134,56

=

Ganhos Úteis Totais (kWh/ano) **4058,70**

Folha de cálculo FCIV.1f – Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m^2
Paredes exteriores		104,00
Coberturas exteriores		100,00
Parede de Armazenamento		6,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, $A \cdot \tau$)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local ($^{\circ}C.dia$)		
		1809,00
$N_i = 4,5 + 0,0395 \text{ GD}$	Para $FF \leq 0,5$	Auxiliar 75,96
$N_i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) \text{ GD}$	Para $0,5 < FF \leq 1$	91,57
$N_i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) \text{ GD}] (1,2 - 0,2FF)$	Para $1 < FF \leq 1,5$	96,46
$N_i = 4,05 + 0,06885 \text{ GD}$	Para $FF > 1,5$	128,60

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/m².ano)

91,57

Folha de cálculo FC IV.2 – Cálculo do índice NiC:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior incluindo P. Armazenamento (de FCIV.1a)	126,93
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,34
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	215,47
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	1809,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	9355,01
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	4058,70
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	5296,31
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	52,96
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	91,57

REGULAMENTAR

Anexo 2.6. Folha de cálculo do RCCTE para a habitação com parede de armazenamento – Bragança

Folha de cálculo FC IV.1e - Ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno):

Ganhos solares:

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m ²)	1,03
	x
Radiação incidente num envidraçado a Sul (Gsul)	
na zona	13 (kWh/m ² .mês)
	95,27
	x
Duração da estação de aquecimento (meses)	6,90
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)	678,55
Ganhos Parede de Armazenamento (kWh/ano)	1271,11

Ganhos úteis totais:

Ganhos Úteis Totais:

$\gamma = \frac{\text{Ganhos (Solares Brutos + Internos Brutos + P. Armazenamento)}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$

Inércia do edifício: 3,00 a = 4,2 $\gamma = 0,30$
 (In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3)

Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos (η) 1,00

x

Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos + Ganhos P. Armazenamento 3936,86

=

Ganhos Úteis Totais (kWh/ano) **3918,51**

Folha de cálculo FC IV.1f - Valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		104,00
Coberturas exteriores		100,00
Parede de Armazenamento		6,00
Envidraçados exteriores		10,00
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A .τ)	220,00
Paredes interiores		0,00
Coberturas interiores		0,00
Pavimentos interiores		0,00
Envidraçados interiores		0,00
Área total:		220,00
		/
Volume (de FCIV.1d):		300,00
		=
Factor de forma FF		0,73
Graus-dias no local (°C.dia)		
		2509,00
N _i = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF ≤ 0,5	Auxiliar 103,61
N _i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF ≤ 1	125,27
N _i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF ≤ 1,5	131,95
N _i = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	176,79

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - N_i (kWh/m².ano)

125,27

Folha de cálculo FC IV. 2 - Cálculo do índice Nic:

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior incluindo P. Armazenamento (de FCIV.1a)	126,93
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	0,00
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	27,34
Renovação de ar (de FCIV.1d)	61,20

	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	215,47
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	2509,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	12974,97
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	3918,51
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	9056,46
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	100,00
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	90,56
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	125,27

REGULAMENTAR

Anexo 3 – Folha de cálculo proposta

Neste anexo é apresentada uma folha de cálculo proposta para a determinação do desempenho energético de paredes de armazenamento térmico simples para a análise do comportamento térmico do edifício durante a estação de aquecimento. São também descritas as alterações necessárias nas restantes folhas de cálculo para incluir a parede de armazenamento no cálculo das perdas térmicas.

Ganhos solares através da parede de armazenamento

Para o cálculo dos ganhos solares através da parede de armazenamento é necessário determinar as características do envidraçado que isola o elemento opaco. Para cada parede de armazenamento é definida a orientação, área total, factor de orientação (X), factor de obstrução (F_s) e o factor solar (F_g). O factor de absorção (α) é definido para a superfície exterior do elemento opaco.

A resistência térmica da camada de ar depende das dimensões, materiais e soluções construtivas da parede de armazenamento, bem como das condições climáticas. O quadro abaixo resume os resultados obtidos deste estudo para três zonas climáticas (Lisboa Porto e Bragança). Estes valores foram obtidos para uma parede de armazenamento com 2m de largura por 3m de altura, situada numa fachada directamente a Sul. A caixilharia é de madeira de pinho (densa). O envidraçado tem 3mm de espessura (baixo teor em ferro), factor solar $g_{\perp} = 0,905$, factor de redução devido à caixilharia $F_g = 0,84$ e factor de obstrução $F_s = 0,90$.

		Lisboa	Porto	Bragança
Espessura do elemento opaco ⁵	20cm	0,283	0,286	0,286
	25cm	0,280	0,283	0,284
	30cm	0,278	0,282	0,283
Espessura da camada de ar ⁶	5cm	0,285	0,288	0,288
	10cm	0,283	0,286	0,286
	15cm	0,283	0,286	0,286
Material do elemento opaco ⁷	Betão	0,283	0,286	0,286
	Pedra	0,284	0,286	0,286

Os coeficientes U_e (coeficiente de transmissão térmica exterior) e U (coeficiente de transmissão térmica total) da parede de armazenamento são calculados através das expressões 3.14 e 3.11, respectivamente.

⁵ Material de armazenamento térmico do elemento opaco composto por betão; camada de ar com 10cm de espessura.

⁶ Material de armazenamento térmico do elemento opaco composto por betão.

⁷ Camada de ar com 10cm de espessura.

A área colectora efectiva da parede de armazenamento é determinada recorrendo à expressão 3.13.

Orientação	Área total (m^2)	X (-)	g_{\perp} (-)	F_s (-) $F_h F_o F_f$	F_g (-)	α (-)	R_{al} ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	U_e ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_s (m^2)

Os ganhos solares brutos são obtidos pela expressão 2.12:

Área colectora efectiva (m^2)		
	x	
Radiação incidente num envidraçado a Sul (G_{sul}) na zona <input type="text"/> ($kWh/m^2 \cdot mês$)		
	x	
Duração da estação de aquecimento (meses)		
	=	
Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)		

Perdas térmicas

Para contabilizar as perdas térmicas é necessário criar os dois seguintes quadros na ficha FCIV.1a para as soluções construtivas das paredes de armazenamento:

DESCRICÃO: Parede de armazenamento				
LOCALIZAÇÃO: envolvente exterior				
No.	Camada	espessura (m)	λ ($W/m \cdot ^\circ C$)	R ($W/m \cdot ^\circ C$)
1	Material de armazenamento térmico			
2	Camada de ar			
3	Envidraçado			
	Rsi	0,13		
	Rse	0,04		
			U =	

Paredes de armazenamento térmico	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U A (W/°C)
Parede de armazenamento 1			
Parede de armazenamento 2			

A folha de cálculo FCIV.1f terá de ser modificada para que o factor de forma contabilize a parede de armazenamento no cálculo do valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i):

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		<input type="text"/>
Coberturas exteriores		<input type="text"/>
Parede de armazenamento		<input type="text"/>
Envidraçados exteriores		<input type="text"/>
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A .τ)	<input type="text"/>
Paredes interiores		<input type="text"/>
Coberturas interiores		<input type="text"/>
Pavimentos interiores		<input type="text"/>
Envidraçados interiores		<input type="text"/>
Área total:		<input type="text"/>
		/
Volume (de FCIV.1d):		<input type="text"/>
		=
Factor de forma FF		<input type="text"/>
Graus-dias no local (°C.dia)		<input type="text"/>
N _i = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF ≤ 0,5	Auxiliar
N _i = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF ≤ 1	<input type="text"/>
N _i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF ≤ 1,5	<input type="text"/>
N _i = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	<input type="text"/>
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)		<input type="text"/>

A folha de cálculo FCIV.2 é também modificada para que as perdas térmicas através da parede de armazenamento sejam contabilizadas no cálculo das necessidades de aquecimento. O coeficiente de perdas de calor da parede de armazenamento é obtido pela expressão 3.10.

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior + Coef. Perdas P. Armazenamento (de FCIV.1a)	
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	
Renovação de ar (de FCIV.1d)	
	=
Coeficiente Global de Perdas (W/°C)	
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	
	x
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - N _{ic} (kWh/m ² .ano)	
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - N _i (kWh/m ² .ano)	

Anexo 4

Anexo 4.1. Coeficientes de transmissão térmica, áreas colectoras efectivas e coeficientes de perda de calor da parede de armazenamento térmico

Variável espessura do elemento opaco – Lisboa:

Espessura do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	U_e ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_s (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
20cm	1,797	3,06	1,93	9,06
25cm	1,729	3,09	1,84	8,72
30cm	1,663	3,11	1,76	8,38

Variável espessura do elemento opaco – Porto:

Espessura do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	U_e ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_s (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
20cm	1,788	3,04	1,93	9,01
25cm	1,720	3,06	1,84	8,67
30cm	1,649	3,06	1,77	8,31

Variável espessura do elemento opaco – Bragança:

Espessura do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	U_e ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_s (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
20cm	1,788	3,04	1,93	9,01
25cm	1,717	3,06	1,85	8,66
30cm	1,649	3,06	1,77	8,31

Variável espessura da camada de ar – Lisboa:

Espessura da camada de ar	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	U_e ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_s (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
5cm	1,791	3,046	1,931	9,027
10cm	1,797	3,064	1,926	9,059
15cm	1,797	3,064	1,926	9,059

Variável espessura da camada de ar – Porto:

Espessura da camada de ar	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Ue ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	As (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
5cm	1,781	3,018	1,939	8,979
10cm	1,788	3,036	1,934	9,011
15cm	1,797	3,064	1,926	9,059

Variável espessura da camada de ar – Bragança:

Espessura da camada de ar	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Ue ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	As (m^2)	Coef. Perda de Calor - H ($W/^\circ C$)
5cm	1,781	3,018	1,939	8,979
10cm	1,788	3,036	1,934	9,011
15cm	1,788	3,036	1,934	9,011

Variável material do elemento opaco – Lisboa:

Material do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Ue ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	As (m^2)	Coef. perda de calor – H ($W/^\circ C$)
Betão	1,797	3,064	1,926	9,059
Pedra	1,837	3,055	1,975	9,260

Variável material do elemento opaco – Porto:

Material do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Ue ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	As (m^2)	Coef. perda de calor – H ($W/^\circ C$)
Betão	1,788	3,036	1,934	9,011
Pedra	1,831	3,036	1,980	9,226

Variável material do elemento opaco – Bragança:

Material do elemento opaco	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Ue ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	As (m^2)	Coef. perda de calor – H ($W/^\circ C$)
Betão	1,788	3,036	1,934	9,011
Pedra	1,831	3,036	1,980	9,226

Anexo 4.2. Ganhos solares, perdas térmicas e ganhos totais obtidos pelo método simplificado e pelo método do EnergyPlus

Variável espessura do elemento opaco – Lisboa:

Espessura do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	841,41	659,11	245,25	5,59	596,16	653,52
25 cm	801,96	627,77	235,92	2,86	566,04	624,91
30 cm	766,52	599,70	226,90	1,39	539,62	598,31

Variável espessura do elemento opaco – Porto:

Espessura do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	1324,89	912,45	391,21	16,23	933,68	896,22
25 cm	1263,14	865,75	376,40	10,29	886,73	855,46
30 cm	1211,06	825,56	360,89	6,56	850,17	819,0

Variável espessura do elemento opaco – Bragança:

Espessura do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
20 cm	1271,11	739,56	542,59	51,12	728,52	688,45
25 cm	1213,49	693,08	521,16	37,28	692,33	655,81
30 cm	1161,89	654,65	500,53	27,88	661,36	626,77

Variável espessura da camada de ar – Lisboa:

Espessura da camada de ar	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
5 cm	843,54	670,57	244,38	5,30	599,16	665,27
10 cm	841,41	659,11	245,25	5,59	596,16	653,52
15 cm	841,41	647,08	245,25	5,78	596,16	641,30

Variável espessura da camada de ar – Porto:

Espessura da camada de ar	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
5 cm	1328,19	931,79	389,82	15,30	938,37	916,49
10 cm	1324,89	912,45	391,21	16,23	933,68	896,22
15 cm	1324,89	892,77	391,21	16,82	933,68	875,95

Variável espessura da camada de ar – Bragança:

Espessura da camada de ar	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
5 cm	1274,27	758,11	540,66	48,86	733,61	709,25
10 cm	1271,11	739,56	542,59	51,12	728,52	688,45
15 cm	1271,11	720,92	542,59	52,83	728,52	668,09

Variável material do elemento opaco – Lisboa:

Material do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
Betão	841,41	659,11	245,25	5,59	596,16	653,52
Pedra	862,67	677,20	250,68	6,50	611,98	670,70

Variável material do elemento opaco – Porto:

Material do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
Betão	1324,89	912,45	391,21	16,23	933,68	896,22
Pedra	1356,52	938,01	400,55	18,20	955,97	919,80

Variável material do elemento opaco – Bragança:

Material do elemento opaco	Ganhos ($kW \cdot h$)		Perdas ($kW \cdot h$)		Ganhos Totais ($kW \cdot h$)	
	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus	Método simplificado	EnergyPlus
Betão	1271,11	739,56	542,59	51,12	728,52	688,45
Pedra	1301,46	762,86	555,55	55,81	745,91	707,06

